



TUGAS AKHIR - SM0141501

**ESTIMASI BIAYA KEBIJAKAN PEMELIHARAAN
JARINGAN DISTRIBUSI LISTRIK (STUDI KASUS:
PT PLN (PERSERO) AREA KOTAMOBAGU)**

ERLINA RUSIANA DEWI
NRP 1212 100 084

Dosen Pembimbing:
Valeriana Lukitosari, S.Si, M.T.

JURUSAN MATEMATIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - SM141501

**COST ESTIMATION OF ELECTRICITY
DISTRIBUTION NETWORK MAINTENANCE
POLICY (CASE STUDY: PT PLN (PERSERO)
AREA KOTAMOBAGU)**

ERLINA RUSIANA DEWI
NRP 1212 100 084

Supervisors:
Valeriana Lukitosari, S.Si, M.T.

DEPARTMENT OF MATHEMATICS
Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

COST ESTIMATION OF ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORK MAINTENANCE POLICY (CASE STUDY: PT PLN (PERSERO) AREA KOTAMOBAGU)

Name : Erlina Rusiana Dewi
NRP : 1212 100 084
Department : Mathematics FMIPA-ITS
Supervisor : Valeriana Lukitosari, S.Si, M.T.

Abstract

Electricity distribution network is one of the complex equipment that require maintenance high cost. Therefore, an analytical optimization method for periodic preventive maintenance (PM) policy proposed. The method includes imperfect PM model based on Weibull distribution and consider the current maintenance interval or T_0 and optimal maintenance interval or T . The Weibull parameter estimated using maximum likelihood estimation (MLE). Given three maintenance policy that considered downtime cost to minimizing total cost for each PM policy. For PM policy 1, 2, and 3 obtained total cost estimation in succession Rp. 44.994.721,82, Rp. 99.808.558,43, and Rp. 474.709.625,49.
Keywords: *hazard rate function, reliability, maximum likelihood estimation, preventive maintenance*

ESTIMASI BIAYA KEBIJAKAN PEMELIHARAAN JARINGAN DISTRIBUSI LISTRIK (STUDI KASUS: PT PLN (PERSERO) AREA KOTAMOBAGU)

Nama Mahasiswa : Erlina Rusiana Dewi
NRP : 1212 100 084
Jurusan : Matematika FMIPA-ITS
Pembimbing : Valeriana Lukitosari, S.Si, M.T.

Abstrak

Jaringan distribusi listrik merupakan salah satu peralatan yang kompleks yang pemeliharaannya membutuhkan biaya yang tinggi. Oleh karena itu, dikembangkan metode optimalisasi secara analitik untuk kebijakan pemeliharaan pencegahan atau preventive maintenance (PM) periodik. Metode termasuk model PM tidak sempurna yang berdistribusi Weibull dengan mempertimbangkan interval PM awal atau T_0 dan interval PM yang optimal atau T . Estimasi parameter Weibull dilakukan menggunakan metode maximum likelihood estimation (MLE). Terdapat tiga kebijakan PM yang dibentuk dengan mempertimbangkan adanya biaya downtime yang dapat meminimalkan total biaya untuk setiap kebijakan PM. Untuk kebijakan PM 1, 2, dan 3 diperoleh estimasi biaya total berturut-turut Rp. 44.994.721,82, Rp. 99.808.558,43, dan Rp. 474.709.625,49.

Kata-kunci: *fungsi laju hazard, keandalan, maximum likelihood estimation, pemeliharaan pencegahan*


.

LEMBAR PENGESAHAN
ESTIMASI BIAYA KEBIJAKAN
PEMELIHARAAN JARINGAN DISTRIBUSI
LISTRIK (STUDI KASUS: PT PLN
(PERSERO) AREA KOTAMOBAGU)
COST ESTIMATION OF ELECTRICITY
DISTRIBUTION NETWORK
MAINTENANCE POLICY (CASE STUDY:
PT PLN (PERSERO) AREA KOTAMOBAGU)

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Bidang Studi Matematika Terapan
Program Studi S-1 Jurusan Matematika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:
ERLINA RUSIANA DEWI
NRP. 1212 100 084

Menyetujui,
Dosen Pembimbing,


Valeriana Lukitosari, S.Si, M.T.

NIP. 19710928 199802 2 001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Matematika
EMIPA ITS


Dr. Inuam Mukhlis, S.Si, M.T.

NIP. 19700831 199403 1 003

Surabaya, Juli 2016

Daftar Simbol

$E[N(t)]$	Ekspektasi jumlah kerusakan
$\lambda(t, T)$	Fungsi laju hazard baru
$\lambda_k(t)$	Fungsi laju hazard awal
t	Waktu terjadinya kerusakan
α	Parameter skala
β	Parameter bentuk
T	Interval PM
N	Jumlah tindakan PM
$\alpha^*(T)$	Fungsi parameter skala terhadap T
$R(t)$	Fungsi Keandalan
$f(t)$	Fungsi probabilitas kepadatan (pdf) kerusakan
$E[D_{PM}]$	Ekspektasi lama <i>downtime</i> akibat PM
$E[D_{CM}]$	Ekspektasi lama <i>downtime</i> akibat CM
$E[D_T]$	Ekspektasi total lama <i>downtime</i>
p	<i>Downtime</i> untuk tiap PM
C_T	Biaya total
C_{PM}	Biaya PM
C_R	Biaya penggantian
C_D	Biaya <i>downtime</i>
C_{MR}	Biaya perbaikan minimal
C_L	Biaya untuk tiap <i>downtime</i>
C_{LC}	Biaya untuk akhir siklus
$C_1(T_1, N_1)$	Biaya per unit waktu kebijakan 1
$C_2(T_2, N_2)$	Biaya per unit waktu kebijakan 2
$C_3(T_3, N_3)$	Biaya per unit waktu kebijakan 3
T_1	Interval PM kebijakan 1
N_1	Jumlah tindakan PM kebijakan 1
T_2	Interval PM kebijakan 2
N_2	Jumlah tindakan PM kebijakan 2
T_3	Interval PM kebijakan 3
N_3	Jumlah tindakan PM kebijakan 3

COST ESTIMATION OF ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORK MAINTENANCE POLICY (CASE STUDY: PT PLN (PERSERO) AREA KOTAMOBAGU)

Name : Erlina Rusiana Dewi
NRP : 1212 100 084
Department : Mathematics FMIPA-ITS
Supervisor : Valeriana Lukitosari, S.Si, M.T.

Abstract

Electricity distribution network is one of the complex equipment that require maintenance high cost. Therefore, an analytical optimization method for periodic preventive maintenance (PM) policy proposed. The method includes imperfect PM model based on Weibull distribution and consider the current maintenance interval or T_0 and optimal maintenance interval or T . The Weibull parameter estimated using maximum likelihood estimation (MLE). Given three maintenance policy that considered downtime cost to minimizing total cost for each PM policy. For PM policy 1, 2, and 3 obtained total cost estimation in succession Rp. 44.994.721,82, Rp. 99.808.558,43, and Rp. 474.709.625,49.
Keywords: *hazard rate function, reliability, maximum likelihood estimation, preventive maintenance*

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
DAFTAR SIMBOL	xxv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Analisa Biaya	7
2.2 Keandalan (<i>Reliability</i>)	8
2.3 Kerusakan (<i>Failure</i>)	9
2.3.1 Probabilitas Kerusakan	10
2.3.2 Laju kerusakan(<i>Hazard Rate</i>)	11

	Halaman
2.3.3 Ukuran Kinerja Sistem	12
2.4 Ekspektasi Jumlah Kerusakan	13
2.5 <i>Downtime</i>	13
2.6 Distribusi Weibull	14
2.7 Pemeliharaan (<i>Maintenance</i>)	15
2.7.1 Pemeliharaan Pencegahan	16
2.7.2 Pemeliharaan Korektif	18
2.8 Kerusakan Jaringan Distribusi Listrik	18
 BAB III METODE PENELITIAN	 21
3.1 Studi Literatur	21
3.2 Perumusan Masalah	21
3.3 Pembentukan Model Matematika	22
3.4 Analisis Model	22
3.5 Penarikan Kesimpulan dan Saran	22
 BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	 23
4.1 Kebijakan Pemeliharaan	23
4.2 Fungsi Laju Hazard	25
4.3 Estimasi Biaya <i>Downtime</i>	37
4.4 Estimasi Biaya Pemeliharaan per Unit Waktu	39
4.4.1 Estimasi Biaya Pemeliharaan Kebijakan 1	 40
4.4.2 Estimasi Biaya Pemeliharaan Kebijakan 2	 41
4.4.3 Estimasi Biaya Pemeliharaan Kebijakan 3	 42
4.5 PM Periodik Optimal	44
4.5.1 Kebijakan Pemeliharaan 1 Optimal ...	45
4.5.2 Kebijakan Pemeliharaan 2 Optimal ...	50
4.5.3 Kebijakan Pemeliharaan 3 Optimal ...	55
4.6 Studi Kasus	60

	Halaman
BAB V PENUTUP	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	73

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Kurva <i>bath up</i>	10
Gambar 2.2 Kerusakan pada sistem yang dapat diperbaiki	14
Gambar 4.1 Hubungan antara $\lambda(t, T)$ dan $\lambda_k(t)$	27
Gambar 4.2 Pengaruh α terhadap $\lambda(t)$	29
Gambar 4.3 Pengaruh T terhadap α pada $\lambda(t, T)$..	30
Gambar 4.4 Grafik kebijakan kontrak pemeliharaan 1	40
Gambar 4.5 Grafik kebijakan kontrak pemeliharaan 2	42
Gambar 4.6 Grafik kebijakan kontrak pemeliharaan 3	43
Gambar 4.7 Plot fungsi laju hazard area Kotamobagu	61
Gambar 4.8 Plot distribusi komulatif area Kotamobagu	62
Gambar 4.9 Plot keandalan sistem area Kotamobagu	62

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Parameter bentuk distribusi Weibull	15
Tabel 4.1 Biaya tiap kebijakan data area Kotamobagu	63
Tabel 4.2 Biaya dengan $T = T_0$ untuk area Kotamobagu	64
Tabel 4.3 Biaya tanpa <i>downtime</i> area Kotamobagu .	64
Tabel 4.4 Pengaruh β untuk kebijakan 1	65
Tabel 4.5 Pengaruh β untuk kebijakan 2	65
Tabel 4.6 Pengaruh β untuk kebijakan 3	65

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A	Data Kerusakan Jaringan Distribusi Listrik Area Kotamobagu Oktober 2015 71
Lampiran B	Uji Mann Data Kerusakan Jaringan Distribusi Listrik Area Kotamobagu . . . 73
Lampiran C	Fungsi Hazard, CDF, dan Keandalan Data Kerusakan Jaringan Distribusi Listrik Area Kotamobagu 75
Lampiran D	Biodata Penulis 77

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan hal-hal yang melatarbelakangi permasalahan yang kemudian permasalahan tersebut dibentuk dalam rumusan masalah yang disertai batasan masalah yang membatasi permasalahan. Terdapat pula tujuan dan manfaat dari penulisan tugas akhir ini, serta gambaran umum penulisan di setiap bab yang dapat dilihat pada sistematika penulisan.

1.1 Latar Belakang

Peralatan dalam bidang kelistrikan merupakan salah satu peralatan kompleks yang digunakan secara kontinu dan akan mengalami deteriorasi atau penurunan fungsi selama penggunaannya. Akibatnya, kerusakan dapat terjadi sewaktu-waktu sehingga menyebabkan terganggunya proses distribusi listrik. Oleh karena itu, dibutuhkan tindakan pemeliharaan pencegahan atau *preventive maintenance* (PM) untuk mencegah terjadinya kerusakan dan pemeliharaan perbaikan atau *corrective maintenance* (CM) untuk memperbaiki kerusakan yang telah terjadi.

Pemeliharaan yang diberikan berupa tindakan PM, perbaikan minimal, dan penggantian menyebabkan sistem mampu kembali ke keadaan semula bahkan hingga seperti keadaan sistem ketika masih baru [1]. Semakin meningkatnya frekuensi pemeliharaan semakin menurunkan terjadinya kerusakan dan *downtime* pada sistem, namun hal tersebut semakin meningkatkan biaya pemeliharaan sehingga keuntungan yang diperoleh perusahaan menurun dan juga

berlaku untuk sebaliknya sehingga diperlukan dibentuknya kebijakan pemeliharaan yang tepat untuk sistem.

Kebijakan PM merupakan salah satu kebijakan yang telah banyak dipelajari oleh peneliti karena merupakan jenis kebijakan pemeliharaan yang terencana yang mampu mengurangi terjadinya deteriorasi dan dapat diterapkan secara terjadwal [2]. Optimalisasi kebijakan PM dengan metode analitik telah dikembangkan oleh C.L. Melchor [1]. Namun pada kebijakan tersebut, biaya yang ditimbulkan akibat adanya *downtime* tidak diperhitungkan. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini diberikan model kebijakan PM periodik yang optimal untuk sistem dengan asumsi bahwa sistem hanya menerima perbaikan minimal jika terjadi kerusakan diantara tindakan PM yang dilakukan sehingga laju hazard sistem tidak berubah dengan pertimbangan adanya *downtime*.

Model PM yang digunakan membutuhkan estimasi parameter untuk menentukan nilai fungsi laju hazard yang merupakan dasar dari model yang dibentuk. Pada tugas akhir ini, fungsi laju hazard yang diberikan diasumsikan berdistribusi Weibull karena merupakan salah satu distribusi yang paling populer untuk memodelkan deteriorasi secara stokastik pada jaringan distribusi listrik karena sangat fleksibel dan dapat memodelkan berbagai jenis sifat laju kerusakan berdasarkan pemberian nilai yang tepat pada parameter bentuk dan skala.

Fungsi biaya yang terbentuk selanjutnya akan digunakan untuk menentukan nilai optimal jumlah PM dan interval PM sehingga diperoleh nilai optimal untuk tiap kebijakan dengan studi kasus pada PT PLN (Persero) area Kotamobagu, Sulawesi Utara.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana membentuk estimasi biaya kebijakan PM berdasarkan pemeliharaan yang diberikan pada jaringan distribusi listrik.
2. Bagaimana pengaruh *downtime* terhadap fungsi biaya per unit waktu yang terbentuk.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini yaitu:

1. Model yang dikembangkan berdasarkan pada kebijakan pemeliharaan yang telah ditentukan pada penelitian V.H. Coria.
2. Fungsi laju hazard mengikuti distribusi Weibull dan digunakan untuk mengetahui akibat tindakan PM tidak sempurna pada keandalan sistem yang dapat diperbaiki.

1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan permasalahan, tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh estimasi biaya kebijakan pemeliharaan untuk tiap alternatif kebijakan pemeliharaan jaringan distribusi listrik.
2. Mengetahui pengaruh adanya *downtime* pada fungsi biaya yang telah terbentuk.

1.5 Manfaat

Manfaat yang dapat diperoleh dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh fungsi estimasi biaya kebijakan PM yang dapat digunakan untuk mengestimasi biaya kebijakan pemeliharaan yang optimal pada jaringan distribusi listrik di PT PLN (Persero) area Kotamobagu.
2. Penggunaan kebijakan PM yang diperoleh sebagai dasar keputusan managerial perusahaan dalam melakukan kontrak pemeliharaan dengan pihak ketiga.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini disusun dalam lima bab, yaitu:

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang gambaran umum dari penulisan tugas akhir yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada Bab ini berisi teori-teori utama maupun penunjang yang terkait dengan permasalahan, yaitu beberapa penelitian terdahulu, teori *downtime*, serta model keandalan sistem yang berkaitan dengan distribusi kerusakan dan teori pemeliharaan. Teori-teori tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam mengerjakan tugas akhir.

3. BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini membahas tentang metode dan tahapan-tahapan dalam proses penyelesaian masalah dan pencapaian tujuan tugas akhir.

4. BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada Bab ini dibahas secara detail mengenai pembentukan model untuk mengestimasi biaya kebijakan pemeliharaan jaringan distribusi listrik yang optimal yang dapat diterapkan di PT PLN (Persero) area Kotamobagu.

5. BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan akhir yang diperoleh dari analisis pada bab sebelumnya serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dibahas mengenai landasan teori dan materi pendukung lainnya yang terkait dengan permasalahan dalam tugas akhir ini, yaitu teori keandalan (*reliability*) sistem, teori kerusakan (*failure*) sistem, teori mengenai pemeliharaan dan *downtime*.

2.1 Analisa Biaya

Biaya adalah pengorbanan sumber ekonomi yang diukur dalam satuan uang yang telah terjadi atau yang kemungkinan akan terjadi untuk tujuan tertentu dan menghasilkan keuntungan yang akan datang [3]. Analisa biaya dibutuhkan bagi perusahaan untuk mengatur keluar masuknya uang perusahaan.

Berdasarkan proses produksi yang dilakukan perusahaan, biaya dapat digolongkan menjadi dua, yaitu [4]:

1. Biaya langsung

Biaya langsung atau (*direct cost*) merupakan biaya langsung yang sengaja dikeluarkan untuk membiayai kegiatan operasional perusahaan yang berkaitan langsung dengan proses produksi. Biaya langsung dibagi menjadi tiga bagian, yaitu biaya langsung material, tenaga kerja, dan pengeluaran lainnya.

2. Biaya tidak langsung

Biaya tidak langsung (*indirect cost*) didefinisikan sebagai keseluruhan biaya tidak langsung yang dikeluarkan perusahaan selama aktifitas operasional

perusahaan berlangsung. Biaya tak langsung akan selalu tetap tanpa dipengaruhi oleh jumlah produksi. Sama halnya dengan biaya langsung, biaya tak langsung juga dibagi menjadi tiga, yaitu biaya tidak langsung untuk material, tenaga kerja, dan pengeluaran lainnya.

Metode perhitungan biaya dapat dilakukan berdasarkan dua cara, yaitu perhitungan biaya per unit yang terjual dan perhitungan biaya per unit terhadap waktu. Dalam laporan tugas akhir ini, perhitungan biaya berdasarkan pada perhitungan biaya per unit terhadap waktu untuk kebijakan PM diberikan oleh [5]:

$$\begin{aligned}
 C(N, T) &= \frac{C_{Total}}{NT} \\
 &= \frac{(N - 1) C_{PM} + C_R + C_{MR} \int_0^{NT} \rho_k(t) dt}{NT}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

dengan,

- $C(N, T)$: biaya per unit terhadap waktu
- C_{Total} : ekspektasi biaya pada satu siklus
- N : jumlah tindakan PM
- T : interval tindakan PM
- C_{PM} : biaya tindakan PM
- C_R : biaya tindakan penggantian
- C_{MR} : biaya perbaikan minimal
- $\rho_k(t)$: fungsi laju hazard.

2.2 Keandalan (*Reliability*)

Kebijakan pemeliharaan dapat dikembangkan dengan menganalisa keandalan dari suatu sistem yang akan dilakukan pemeliharaan. Keandalan didefinisikan sebagai probabilitas suatu komponen atau sistem dapat memenuhi fungsi yang ditentukan dalam periode waktu tertentu dalam

kondisi pengoperasian yang stabil atau probabilitas waktu terjadinya kerusakan lebih besar dari waktuoperasional sistem. Berdasarkan definisi tersebut, fungsi keandalan dari suatu unit dapat dituliskan sebagai fungsi terhadap waktu yaitu [6]:

$$R(t) = P(T_f \geq t)$$

dengan,

$R(t)$: fungsi keandalan sistem

T_f : waktu kerusakan sistem

t : waktu operasional sistem

dengan $0 \leq R(t) \leq 1$.

2.3 Kerusakan (*Failure*)

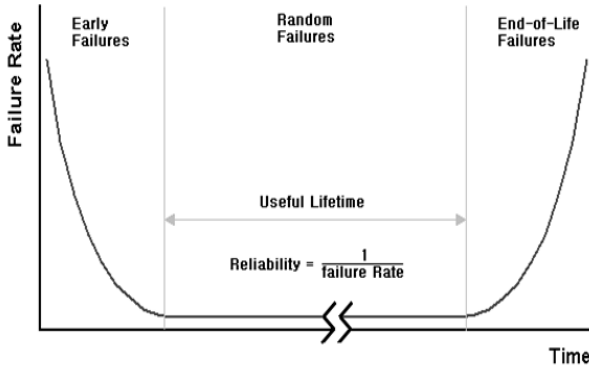
Kerusakan atau kegagalan merupakan suatu keadaan ketika suatu sistem tidak berada pada kondisi sesuai dengan fungsinya berdasarkan jadwal yang telah ditentukan [6].

Kerusakan dapat diklasifikasikan menggunakan suatu kurva yang disebut sebagai kurva *bath up* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 [6]. Terdapat tiga jenis kerusakan, yaitu kerusakan yang menurun terhadap waktu atau *decreasing failure rate* (DFR), tingkat kerusakan konstan atau *constant failure rate* (CFR), dan tingkat kerusakan yang meningkat terhadap waktu atau *increasing failure rate* (IFR).

Umur pakai peralatan dalam kurva *bathtub* dibedakan menjadi tiga periode, yaitu:

1. *Infant Mortality*

Pada periode waktu ini dimulai dengan laju kegagalan yang tinggi kemudian terjadi penurunan nilai laju kegagalan yang tajam. Besarnya nilai laju kegagalan ini disebabkan adanya kemungkinan cacat produksi dari peralatan, kerusakan pada saat transportasi, kerusakan instalasi dan lain-lain.



Gambar 2.1: Kurva *bath up*

2. *Useful Life*

Peralatan sudah dipasang dan siap dipergunakan atau peralatan dapat berfungsi sebagaimana mestinya sehingga nilai laju kegagalan dalam periode ini adalah rendah dan mendekati konstan. Namun kegagalan dapat terjadi pada kemungkinan dan waktu yang acak.

3. *Wear Out*

Pada periode ini laju kegagalan meningkat dengan cepat karena terjadinya aus dalam peralatan sampai pada akhirnya peralatan tersebut rusak dan harus digantikan dengan yang baru.

2.3.1 Probabilitas Kerusakan

Jika didefinisikan variabel acak kontinu T_f sebagai waktu kerusakan sistem, dengan $T_f \geq 0$ dan didefinisikan

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T_f \leq t)$$

dengan $0 \leq F(t) \leq 1$. $F(t)$ merupakan probabilitas kerusakan yang terjadi selama selang waktu t dan untuk

selanjutnya didefinisikan sebagai fungsi distribusi komulatif atau *cumulative distribution function* (CDF) dari kerusakan [10]:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$

dengan $f(t)$ adalah fungsi probabilitas kepadatan atau *probability density function* (PDF) dari kerusakan yang didefinisikan oleh [6]:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}.$$

Secara umum $F(t)$ disebut sebagai fungsi ketidakandalan, sebaliknya fungsi keandalan didefinisikan oleh

$$R(t) = \int_t^\infty f(t)dt$$

dengan batasan $0 \leq F(t) \leq 1$ dan $0 \leq R(t) \leq 1$.

2.3.2 Laju kerusakan(*Hazard Rate*)

Keandalan dari suatu sistem dapat dipahami melalui laju kerusakan atau banyaknya kerusakan yang terjadi per satuan waktu. Probabilitas dari kerusakan yang terjadi selama interval $[t, t + \Delta t]$ didefinisikan oleh [6]:

$$\begin{aligned} P(t \leq T_f \leq t + \Delta t) &= F(t + \Delta t) - F(t) \\ &= 1 - R(t + \Delta t) - 1 + R(t) \\ &= R(t) - R(t + \Delta t) \end{aligned}$$

dan probabilitas bersyarat dari kerusakan didefinisikan oleh:

$$\begin{aligned}
 P(t \leq T_f \leq t + \Delta t | T_f \geq t) &= \frac{P(t \leq T_f \leq t + \Delta t)}{P(T_f \geq t)} \\
 &= \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{1 - F(t)} \\
 &= \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)}
 \end{aligned}$$

sehingga diperoleh probabilitas bersyarat dari kerusakan per unit waktu atau laju hazard sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 h(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-[R(t + \Delta t) - R(t)]}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} \\
 &= \frac{-dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \\
 &= \frac{f(t)}{R(t)}.
 \end{aligned}$$

2.3.3 Ukuran Kinerja Sistem

Keandalan dari suatu sistem seringkali dinyatakan dalam bentuk angka yang menyatakan ekspektasi masa pakainya. Berdasarkan data statistik yang telah diketahui, suatu sistem dapat diketahui kinerjanya dengan metode *mean time to failure* (MTTF) dan *mean time between failure* (MTBF).

1. Mean Time To Failure (MTTF)

MTTF merupakan salah satu ukuran keandalan yang paling banyak digunakan. MTTF digunakan untuk unit yang tidak dapat diperbaiki. MTTF didefinisikan sebagai harapan atau nilai rata-rata waktu kerusakan saat T . MTTF didefinisikan sebagai berikut [6] :

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt.$$

2. *Mean Time Between Failure*(MTBF)

MTBF merupakan rata-rata waktu antara dua kerusakan pada suatu unit. MTBF digunakan untuk peralatan yang dapat dilakukan perbaikan. MTBF memberikan informasi tentang seberapa sering suatu unit kehilangan fungsinya atau bahkan berhenti beroperasi. MTBF didefinisikan oleh [6] :

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt.$$

2.4 Ekspektasi Jumlah Kerusakan

Misalkan $h(t)$ merupakan intensitas atau laju kerusakan pada saat t yang mengikuti suatu distribusi tertentu dan $h(t, T)$ adalah laju kerusakan ketika sistem setelah diberikan tindakan pemeliharaan dengan $0 \leq t < T$, dimana t merupakan waktu terjadinya kerusakan dan T interval PM yang dilakukan. Berdasarkan hal tersebut dapat diperoleh ekspektasi jumlah kerusakan sistem hingga pada masa *wear out* untuk satu kali siklus penggantian $\Theta = NT$ sebagai berikut [1]:

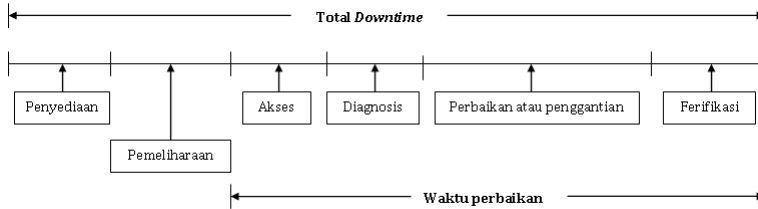
$$E [N (\Theta)] = \int_0^{NT} h(t, T) dt.$$

2.5 *Downtime*

Jika suatu sistem mengalami kerusakan, maka dibutuhkan proses perbaikan. Jumlah waktu dimana suatu peralatan tidak dapat beroperasi akibat adanya kerusakan atau tindakan pemeliharaan lain inilah yang disebut sebagai *downtime*.

Berdasarkan waktu terjadinya, *downtime* dapat dibedakan menjadi dua, yaitu *downtime* terjadwal dan *downtime* tak terjadwal. *downtime* terjadwal merupakan *downtime* yang terjadi secara periodik atau telah direncanakan akibat adanya tindakan PM yang telah dijadwalkan sebelumnya.

Sedangkan *downtime* yang tak terjadwal merupakan *downtime* yang terjadi akibat adanya kerusakan pada sistem yang membutuhkan proses perbaikan secara tiba-tiba.



Gambar 2.2: Kerusakan pada sistem yang dapat diperbaiki

Total *downtime* dapat disebabkan oleh beberapa hal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 [6]. Waktu tunda penyediaan *spare part* dan pemeliharaan dipengaruhi oleh faktor luar sehingga bukan bagian waktu perbaikan dari sistem. Pada tugas akhir ini, peralatan dan *spare part* yang dibutuhkan untuk tindakan pemeliharaan diasumsikan telah tersedia sehingga waktu tunda akibat penyediaan peralatan maupun *spare part* sama dengan nol atau dapat diabaikan.

Waktu perbaikan diberikan sebagai variabel acak karena pengulangan tindakan perbaikan dapat memberikan hasil yang berbeda terhadap total waktu perbaikan. Misalkan T adalah variabel acak yang mempresentasikan waktu perbaikan unit yang mengalami kerusakan dengan fungsi probabilitas kepadatan $f(t)$, maka rata-rata waktu perbaikan diberikan sebagai berikut [6]:

$$MTTR = \int_0^{\infty} t f(t) dt.$$

2.6 Distribusi Weibull

Distribusi Weibull diperkenalkan oleh seorang matematikawan yang bernama Wallodi Weibull. Distribusi

Weibull sering digunakan dalam pemodelan analisis kelangsungan hidup suatu sistem yang memiliki daerah fungsi peluang densitas positif dengan peubah acak kontinu.

Distribusi Weibull digunakan untuk laju kerusakan yang tidak konstan atau bergantung waktu. Distribusi Weibull memiliki dua parameter, yaitu parameter bentuk (β) dan parameter skala (α). Parameter bentuk digunakan untuk menggambarkan bentuk distribusi sedangkan parameter skala digunakan untuk menggambarkan sebaran data. Fungsi probabilitas kepadatan pada distribusi Weibull didefinisikan oleh [6]:

$$h(t) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right), & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}$$

dengan $\alpha > 0$, $\beta > 0$, dan $t > 0$.

Karakteristik dari laju kerusakan dapat diketahui melalui nilai β seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1: Parameter bentuk distribusi Weibull

β	Jenis laju kerusakan
$0 < \beta < 1$	DFR
$\beta = 1$	CFR (sama dengan distribusi eksponensial)
$1 < \beta < 2$	IFR (<i>concave</i>)
$\beta = 2$	berdistribusi Reyleigh (LFR)
$\beta > 2$	IFR (<i>convex</i>)
$\beta = 2,5$	mendekati distribusi lognormal
$3 \leq \beta \leq 4$	IFR (mendekati distribusi normal)

2.7 Pemeliharaan (*Maintenance*)

Pemeliharaan merupakan segala tindakan atau teknik yang dilakukan untuk menjaga suatu sitem atau unit berada

pada keadaan yang sesuai dengan fungsi yang diinginkan [6]. Suatu sistem umumnya beroperasi di bawah kondisi yang berat seperti, pembebanan, guncangan, berkarat, suhu yang tinggi, dan lain-lain. Hal tersebut menyebabkan sistem mengalami penurunan fungsi hingga perlu dilakukan suatu pemeliharaan yang tepat.

Pemeliharaan dilakukan untuk meningkatkan mutu dan keandalan pada sistem distribusi dalam rangka mengurangi kerusakan peralatan yang sifatnya mendadak, menurunkan biaya pemeliharaan dan mendapatkan simpati serta kepuasan pelanggan dalam pelayanan tenaga listrik.

Pada tugas akhir ini, metode pemeliharaan yang digunakan adalah metode PM dan CM.

2.7.1 Pemeliharaan Pencegahan

Tindakan PM merupakan salah satu tindakan pemeliharaan yang direncanakan dan dilakukan sebagai tindakan pencegahan untuk mengurangi deteriorasi atau penurunan mutu sistem serta mengurangi resiko kerusakan operasional suatu sistem yang dilakukan selama sistem beroperasi. Pemeliharaan pencegahan merupakan tindakan pada waktu diskrit, namun dapat berupa waktu kontinu jika dilakukan sangat sering. Jenis-jenis pemeliharaan pencegahan antara lain [6]:

1. Pencegahan kerusakan

Tindakan pencegahan kerusakan dilakukan dengan melakukan tindakan rutin yang terencana seperti, pembersihan, pemeriksaan, dan penelitian.

2. Pendeteksian kerusakan

Kerusakan pada suatu unit dapat diketahui secara langsung maupun tidak. Untuk mengetahui kerusakan yang akan terjadi perlu dilakukan pendeteksian pengujian berupa pengujian, percobaan, dan penelitian.

Dalam literatur keandalan dan pemeliharaan, kebijakan PM dibagi menjadi dua, yaitu PM periodik dan sekuensial [7]. PM periodik digunakan pada interval waktu tetap, sedangkan PM sekuensial diterapkan pada interval waktu yang tidak sama atau kontinu. PM sekuensial lebih baik digunakan ketika sistem memerlukan pemeliharaan yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya usia sistem, sedangkan PM periodik lebih tepat digunakan untuk pemeliharaan yang terjadwal.

Pada tugas akhir ini, sistem menggunakan kebijakan PM periodik pada interval waktu tetap kT ($k = 1, 2, \dots, N$) dengan T merupakan interval waktu antar tindakan PM yang dilakukan dan N adalah jumlah tindakan PM yang dilakukan. Pada saat waktu ke- t_N atau akhir siklus penggantian, diberikan tindakan CM berupa tindakan penggantian yang mengakibatkan laju hazard sistem menjadi sama dengan nol atau mengembalikan sistem dalam keadaan "*as good as new*".

Tindakan PM yang dilakukan memberikan akibat yang tidak sempurna (*imperfet*) pada sistem, yaitu menyebabkan sistem berada dalam keadaan antara "*as good as new*" dan "*as bad as old*". Pada interval antar tindakan PM, jika sistem mengalami kerusakan, maka diberikan tindakan perbaikan minimal (*minimal repair*). Perbaikan minimal merupakan model yang sesuai untuk sistem kompleks dimana jika terjadi kerusakan pada komponen, maka sistem tetap dapat beroperasi dengan melakukan penggantian terhadap komponen tersebut. Komponen dalam hal ini bukan merupakan komponen yang krusial bagi sistem. Hal tersebut mengakibatkan laju hazard dari sistem sebelum mengalami kerusakan hampir sama dengan setelah diberikan tindakan perbaikan minimal.

2.7.2 Pemeliharaan Korektif

Tindakan CM merupakan tindakan pemeliharaan yang tidak dijadwalkan dan dilakukan ketika komponen atau sistem telah mengalami kerusakan. Pada dasarnya tindakan CM meliputi [8]:

1. Tindakan penggantian (*replacement*)
Tindakan penggantian komponen yang dianggap rusak atau tidak memenuhi kondisi yang diinginkan. Tindakan ini mungkin dilakukan secara mendadak atau dengan perencanaan pencegahan terlebih dahulu. Penggantian membuat kondisi sistem menjadi bagus seperti baru. Hal tersebut mengindikasikan bahwa $h(t)$ sistem kembali ke nol.
2. Perbaikan kecil (*minimal repair*)
Tindakan perbaikan kecil dilakukan pada saat terjadi kerusakan kecil. Perbaikan kecil tidak membuat perubahan yang signifikan pada sistem.
3. Perbaikan besar (*overhaul*)
Overhaul merupakan tindakan perbaikan besar-besaran yang biasanya dilakukan pada akhir periode tertentu. *Overhaul* dilakukan sebagai tindakan penyegaran yang dilakukan pada komponen sebelum sampai pada keadaan gagal. *Overhaul* tidak dapat membuat sistem menjadi bagus seperti baru tetapi dapat memperbaiki sistem dengan mengganti komponen yang telah lama penggunaannya.

2.8 Kerusakan Jaringan Distribusi Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan pembangkit atau sumber ke fasilitas atau peralatan pelanggan [9]. Jaringan distribusi listrik merupakan sebuah peralatan yang digunakan secara

terus-menerus atau kontinu dan akan mengalami penurunan fungsi atau deteriorasi di sepanjang penggunaannya. Adanya kerusakan atau gangguan pada jaringan distribusi listrik dapat menyebabkan terputusnya penyaluran energi listrik pada konsumen.

Berdasarkan sifat gangguan yang terjadi, pada sistem distribusi listrik kerusakan dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Gangguan temporer

Gangguan temporer merupakan gangguan yang bersifat sementara karena dapat hilang dengan sendirinya dengan cara memutuskan bagian yang terganggu sesaat, kemudian menutup balik kembali, baik secara otomatis (*autorecloser*) maupun secara manual oleh operator. Bila gangguan tidak dapat dihilangkan dengan sendirinya atau dengan bekerjanya alat pengaman (*recloser*), maka hal tersebut dapat menjadi gangguan tetap dan dapat menyebabkan pemutusan tetap. Bila gangguan sementara terjadi berulang-ulang dapat menyebabkan gangguan permanen yang menyebabkan kerusakan peralatan.

2. Gangguan permanen

Gangguan permanen merupakan gangguan yang bersifat tetap, sehingga untuk membebaskannya perlu tindakan perbaikan atau penghilangan penyebab gangguan. Hal ini ditandai dengan jatuhnya (*trip*) kembali pemutus daya setelah operator memasukkan sistem kembali setelah terjadi gangguan. Untuk mengatasi gangguan permanen, sebuah peralatan harus dilengkapi dengan sistem pengaman *relay*. Adanya sistem pengaman ini diharapkan dapat mendeteksi adanya gangguan.

BAB III

METODE PENELITIAN

Pada bab ini diuraikan langkah-langkah sistematis yang dilakukan dalam proses pengerjaan tugas akhir. Metode penelitian terdiri atas lima tahap, antara lain: studi literatur, perumusan masalah, pembentukan model matematika, analisis model, dan penarikan kesimpulan dan saran.

3.1 Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan identifikasi permasalahan dan metode yang akan digunakan serta pemahaman teori dengan mencari dan mempelajari literatur-literatur yang berkaitan dengan pemeliharaan peralatan kompleks, model kerusakan, dan pembentukan biaya melalui buku, jurnal, tugas akhir, tesis, artikel ilmiah, maupun referensi dari internet.

3.2 Perumusan Masalah

Pada tahap ini, setelah referensi-referensi terkumpul selanjutnya dilakukan perumusan permasalahan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi jenis-jenis kebijakan yang dapat diterapkan.
2. Penentuan jenis-jenis biaya yang ditimbulkan terhadap kebijakan pemeliharaan yang dibentuk.
3. Penentuan pengaruh *downtime* terhadap biaya kebijakan pemeliharaan.
4. Penentuan alternatif kebijakan pemeliharaan yang dapat diterapkan.

3.3 Pembentukan Model Matematika

Tahapan yang dilakukan pada pembentukan model matematika, yaitu:

1. Menentukan fungsi laju hazard pada jaringan distribusi listrik.
2. Menentukan fungsi biaya untuk setiap kebijakan pemeliharaan yang telah terbentuk dengan pertimbangan adanya *downtime* berdasarkan jenis-jenis biaya yang ditimbulkan yang berdasarkan pada model biaya yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya.

3.4 Analisis Model

Pada tugas akhir ini, analisis model dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Penentuan nilai optimal untuk interval PM dan jumlah tindakan PM.
2. Estimasi parameter menggunakan metode *maximum likelihood estimation* (MLE) dengan MATLAB.
3. Studi kasus perhitungan biaya untuk tiap kebijakan PM.

3.5 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Setelah dilakukan analisis dan pembahasan maka dapat ditarik suatu kesimpulan dan saran sebagai masukan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas mengenai estimasi biaya kontrak pemeliharaan untuk jaringan distribusi listrik dengan studi kasus di PT PLN (Persero) area Kotamobagu. Pembahasan dimulai dengan analisis kerusakan untuk penentuan alternatif kebijakan yang dapat dibentuk untuk kontrak pemeliharaan. Kemudian dibentuk fungsi laju hazard yang selanjutnya digunakan untuk pembentukan model biaya per unit waktu untuk tiap kebijakan. Setelah model terbentuk, tahap selanjutnya adalah analisis model.

4.1 Kebijakan Pemeliharaan

Kebijakan pemeliharaan merupakan suatu kontrak jasa pelayanan pemeliharaan terhadap suatu unit atau sistem yang dilakukan oleh pihak ketiga atau perusahaan pemberi jasa pemeliharaan pada periode tertentu sesuai kesepakatan. Berdasarkan jenis-jenis kerusakan yang terjadi pada jaringan distribusi listrik, maka untuk selanjutnya kebijakan untuk kontrak pemeliharaan yang dibentuk didasarkan pada tindakan PM dan tindakan CM yang dilakukan.

Pada tugas akhir ini, biaya yang dilibatkan terdiri dari empat biaya, yaitu biaya pemeliharaan pencegahan, biaya penggantian, biaya perbaikan minimal, dan biaya *downtime* atau kerugian. Spesifikasi untuk keempat biaya tersebut, yaitu:

1. Biaya pemeliharaan pencegahan merupakan biaya yang timbul akibat diberikannya tindakan pemeliharaan pencegahan yang telah terjadwal sebelumnya.

2. Biaya penggantian merupakan biaya yang timbul akibat adanya tindakan penggantian atau *replacement* (R) terhadap sistem yang tidak dapat diperbaiki.
3. Biaya perbaikan minimal merupakan biaya yang timbul ketika terjadi kerusakan pada sistem yang masih dapat diperbaiki.
4. Penentuan biaya kerugian ditentukan berdasarkan kriteria terjadinya kerugian yang dilihat dari aspek lamanya *downtime* sistem sehingga mengakibatkan kerugian produksi (*loss production*).

Berdasarkan tindakan pemeliharaan yang dilakukan dan kriteria kerusakan jaringan distribusi listrik, maka dapat dibentuk tiga alternatif kebijakan pemeliharaan, yaitu:

1. Kebijakan pemeliharaan 1

Pada kebijakan ini, kontrak akan bernilai optimal jika usia sistem hingga terjadinya satu kali siklus penggantian lebih lama dibandingkan dengan periode kontrak. Kontrak berakhir ketika periode kontrak mencapai satu siklus NT , dengan N merupakan jumlah tindakan PM dan T merupakan interval PM. Pada kebijakan ini pihak penyedia jasa pemeliharaan memberikan tindakan PM dan tindakan CM. Tindakan CM yang diberikan hanya berupa perbaikan minimal. Jika terjadi kerusakan pada sistem yang membutuhkan tindakan penggantian, maka hal tersebut berada di luar kewajiban pihak penyedia jasa pemeliharaan. Pihak penyedia jasa pemeliharaan dapat melakukan tindakan penggantian, namun perusahaan harus menanggung biaya tambahan di luar kontrak yang telah disepakati. Berdasarkan hal tersebut, periode kontrak kebijakan 1 akan bernilai optimal jika berakhir sebelum tindakan penggantian terjadi ($R > NT$).

2. Kebijakan pemeliharaan 2

Pada kebijakan ini, pihak penyedia jasa pemeliharaan memberikan tindakan PM dan tindakan CM. Tindakan CM yang diberikan berupa perbaikan minimal dan penggantian. Namun, tindakan penggantian pada sistem hanya dilakukan sekali selama kontrak atau hanya untuk satu siklus penggantian sistem. Kontrak akan bernilai optimal jika periode kontrak berakhir tepat ketika waktu terjadinya tindakan penggantian ($NT = R$).

3. Kebijakan pemeliharaan 3

Jika pada kebijakan pemeliharaan 1 dan 2 hanya diberikan tindakan pemeliharaan untuk satu siklus penggantian, pada kebijakan pemeliharaan 3 diberikan tindakan PM dan CM untuk beberapa kali siklus penggantian bergantung pada periode kontrak. Tindakan penggantian yang dilakukan selama kontrak dilakukan secara berulang sesuai kesepakatan kedua belah pihak. Berdasarkan hal tersebut, kontrak akan bernilai optimal jika tindakan penggantian yang diberikan terjadi sebelum periode kontrak berakhir ($R < NT$).

Pada tahap selanjutnya, untuk menentukan estimasi biaya setiap kebijakan terlebih dahulu ditentukan fungsi laju hazard untuk mengetahui ekspektasi jumlah terjadinya kerusakan yang membutuhkan tindakan perbaikan minimal dan jenis tindakan PM untuk mengetahui pengaruh tindakan PM yang diberikan terhadap laju hazard sistem.

4.2 Fungsi Laju Hazard

Pada tugas akhir ini, fungsi laju hazard dikembangkan berdasarkan model tindakan PM yang tidak sempurna dengan waktu terjadinya kerusakan sebagai variabel acak tunggal.

Diasumsikan bahwa laju hazard sistem meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah tindakan PM. Misalkan diberikan fungsi laju hazard sistem pada saat t setelah tindakan pemeliharaan pencegahan ke- k adalah $\lambda_k(t)$ dengan $0 \leq t < T$, maka berdasarkan sifat fungsi laju hazard yang meningkat dapat dinyatakan bahwa $\lambda_k(t) < \lambda_{k+1}(t)$.

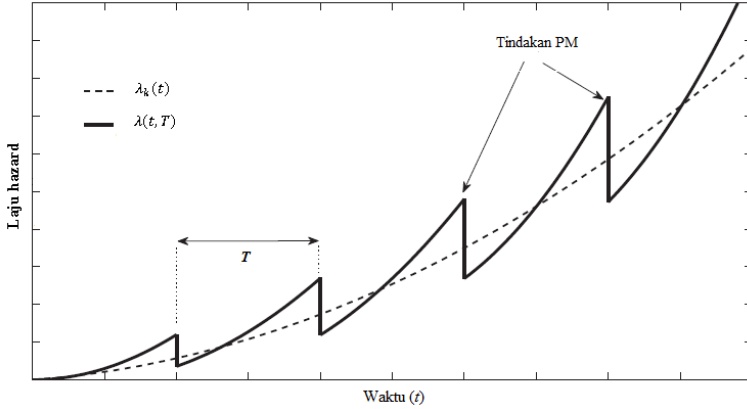
Beberapa komponen pada jaringan distribusi listrik merupakan sistem yang dapat diperbaiki. Hal tersebut karena setelah terjadinya kerusakan pada salah satu komponen dan dilakukan perbaikan pada sistem, sistem dapat beroperasi kembali seperti keadaan sebelum terjadinya kerusakan. Terjadinya kerusakan yang tidak dapat dipastikan secara pasti mengakibatkan waktu terjadinya kerusakan didefinisikan sebagai variabel acak.

Sebagian besar peralatan pada jaringan distribusi listrik yang dapat diperbaiki menunjukkan kecenderungan penurunan keandalan dalam jangka waktu yang lama dengan adanya pengulangan tindakan penggantian. Hal tersebut menyebabkan waktu antar kerusakan saling berkaitan sehingga tidak lagi berdistribusi secara identik. Pada tugas akhir ini, fungsi laju hazard pada sistem diasumsikan berdistribusi Weibull yang merupakan distribusi yang paling banyak digunakan untuk menganalisis kerusakan pada suatu sistem.

Langkah awal untuk memperoleh fungsi laju hazard adalah dengan menentukan jumlah terjadinya kerusakan hingga sistem mengalami satu kali siklus penggantian dengan periode untuk satu siklus dinyatakan sebagai $t = NT$. Ekspektasi jumlah terjadinya kerusakan untuk satu siklus penggantian dinyatakan sebagai berikut [1]:

$$E[N(t)] = \int_0^{NT} \lambda(t, T) dt \quad (4.1)$$

dengan $\lambda(t, T)$ merupakan fungsi laju hazard yang berdistribusi Weibull yang dipengaruhi oleh interval PM (T). Fungsi laju hazard $\lambda(t, T)$ merupakan fungsi untuk sistem yang diberikan tindakan PM yang tidak sempurna yang memperlambat fungsi laju hazard sebelumnya, yaitu $\lambda_k(t)$. Gambar 4.1 menunjukkan perbedaan antara fungsi laju hazard lama $\lambda_k(t)$ dengan fungsi laju hazard yang baru $\lambda(t, T)$.



Gambar 4.1: Hubungan antara $\lambda(t, T)$ dan $\lambda_k(t)$

Diasumsikan bahwa fungsi laju hazard $\lambda(t, T)$ mengikuti distribusi Weibull dengan parameter skala dan bentuk berturut-turut adalah α dan β . Berdasarkan distribusi Weibull ($t \sim W(\alpha, \beta)$), fungsi laju hazard diberikan oleh persamaan berikut:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (4.2)$$

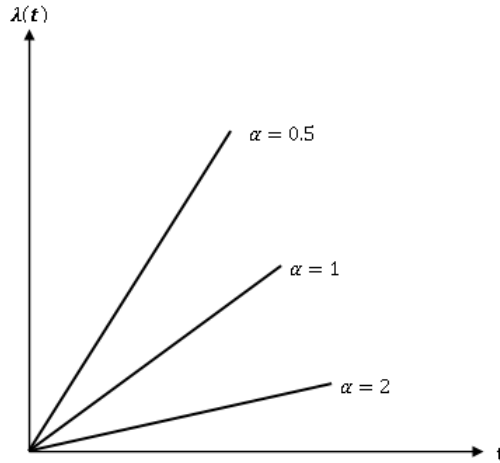
Untuk mengetahui pengaruh interval PM (T) terhadap fungsi

laju hazard, pertimbangan berikut ini perlu diperhatikan, yaitu:

1. Tujuan dari tindakan PM adalah memperlambat proses penurunan fungsi kinerja sistem serta mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan.
2. Parameter β mempengaruhi bentuk laju hazard $\lambda(t)$ yang dapat menunjukkan karakteristik penuaan sistem ($\beta > 1$ menandakan sistem yang *wear out*, dimana semakin semakin bertambahnya usia sistem semakin bertambah pula penurunan fungsi sistem).
3. Parameter α memperluas atau mempersempit laju hazard $\lambda(t)$ yang mendeskripsikan tingkat ukuran deteriorasi sistem serta tingkat kerusakan sistem pada saat tertentu.

Berdasarkan hal tersebut, dapat diperoleh bahwa laju hazard dapat dijadikan fungsi terhadap T hanya dengan parameter α . Pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa semakin meningkatnya α , maka semakin menurunkan kemiringan laju hazard.

Jika interval PM dikurangi, maka jumlah tindakan PM yang dilakukan akan semakin meningkat. Hal tersebut berakibat pada semakin menurunnya kemungkinan terjadinya kerusakan dan penuaan sistem yang dapat digambarkan dengan semakin meningkatnya parameter α yang menandakan semakin melebarnya kemiringan dari laju hazard. Sebaliknya, jika interval PM ditingkatkan, maka jumlah tindakan PM yang dilakukan akan semakin menurun. Hal tersebut berakibat pada semakin meningkatnya kemungkinan terjadinya kerusakan dan penuaan sistem yang dapat digambarkan dengan semakin menurunnya parameter α yang menandakan semakin menyempitnya kemiringan dari laju hazard. Pada Gambar 4.2 menunjukkan pengaruh parameter



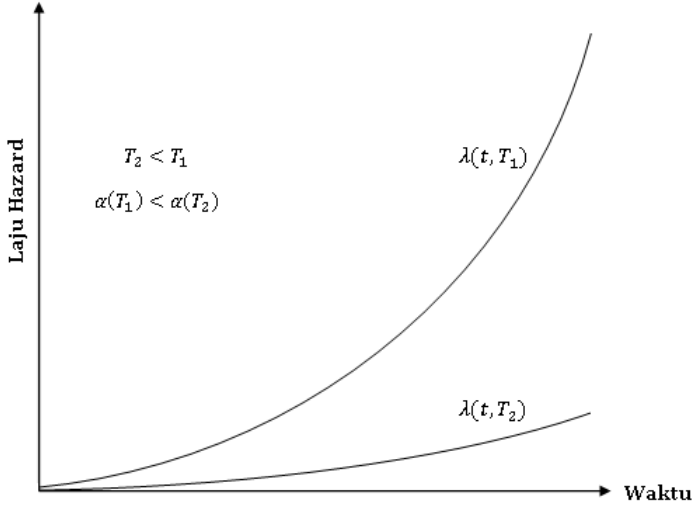
Gambar 4.2: Pengaruh α terhadap $\lambda(t)$

α terhadap kemiringan laju hazard [6]. Berdasarkan hal tersebut dapat diketahui bahwa semakin meningkatnya T , maka semakin menurunkan nilai α dan sebaliknya. Pada Gambar 4.3 menunjukkan pengaruh T terhadap laju hazard jika diberikan interval PM T_1 dan T_2 dengan $T_1 < T_2$ [1].

Berdasarkan pengertian yang telah diberikan sebelumnya dapat diperoleh bahwa $\alpha_2 < \alpha_1$. Untuk mendeskripsikan parameter α sebagai fungsi terhadap T diberikan $\alpha = \alpha^*(T)$ dengan ketentuan harus memenuhi tiga kondisi berikut:

1. $\alpha^*(T)$ bergerak monoton turun dengan semakin bertambahnya interval PM, yaitu $\alpha(T_2) < \alpha(T_1)$ untuk $T_1 < T_2$.
2. $\lim_{T \rightarrow \infty} \alpha^*(T) = \alpha_\infty$, dengan α_∞ yang sesuai untuk parameter α adalah ketika sistem tidak diberikan pemeliharaan.
3. $\alpha^*(T) \rightarrow +\infty$ untuk $T \rightarrow 0$, pada kasus yang ideal,

sistem diberikan pemeliharaan secara kontinu hingga laju hazardnya mendekati nol ($\lambda(t, T) \rightarrow 0$).



Gambar 4.3: Pengaruh T terhadap α pada $\lambda(t, T)$

Diberikan persamaan untuk fungsi $\alpha(T)$ sebagai berikut:

$$\alpha^*(T) = \alpha_\infty + \frac{\gamma}{T} \quad (4.3)$$

dengan γ adalah parameter baru yang dibentuk yang nilainya lebih besar dari nol ($\gamma > 0$). Akan ditunjukkan bahwa persamaan 4.3 memenuhi ketiga kondisi di atas.

1. Untuk $T_1 < T_2 < \dots < T_N < T_{N+1} < \dots$, maka akan memenuhi

$$\frac{1}{T_1} > \frac{1}{T_2} > \dots > \frac{1}{T_N} > \frac{1}{T_{N+1}} > \dots$$

sehingga dengan mudah dapat dinyatakan bahwa

$$\alpha^*(T_1) > \alpha^*(T_2) > \cdots > \alpha^*(T_N) > \alpha^*(T_{N+1}) > \cdots$$

Sehingga jelas bahwa $\alpha^*(T)$ bergerak monoton turun.

$$2. \lim_{T \rightarrow \infty} \alpha^*(T) = \alpha_\infty$$

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow \infty} \alpha^*(T) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\alpha_\infty + \frac{\gamma}{T} \right) \\ &= \alpha_\infty + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\gamma}{T} \\ &= \alpha_\infty + \gamma \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \\ &= \alpha_\infty + (\gamma \cdot 0) \\ &= \alpha_\infty + 0 \\ &= \alpha_\infty \quad (\text{terbukti}) \end{aligned}$$

$$3. \alpha^*(T) \rightarrow +\infty \text{ untuk } T \rightarrow 0$$

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow 0} \alpha^*(T) &= \lim_{T \rightarrow 0} \left(\alpha_\infty + \frac{\gamma}{T} \right) \\ &= \alpha_\infty + \lim_{T \rightarrow 0} \frac{\gamma}{T} \\ &= \alpha_\infty + \gamma \lim_{T \rightarrow 0} \left(\frac{1}{T} \right) \\ &= \alpha_\infty + (\gamma \cdot \infty) \\ &= \alpha_\infty + \infty \\ &= +\infty \quad (\text{terbukti}) \end{aligned}$$

Terbukti bahwa persamaan 4.3 memenuhi ketiga kondisi tersebut sehingga dapat digunakan.

Pada pemeliharaan dalam kehidupan nyata, perusahaan

biasanya telah menetapkan interval PM pada waktu tetap kT_0 ($k = 1, 2, \dots, N$) sendiri berdasarkan pengalaman dan data yang dimiliki perusahaan yang untuk selanjutnya dilambangkan sebagai T_0 . Namun T_0 bukan merupakan interval PM yang optimal karena tidak berdasarkan pada perhitingan matematis yang pasti, akan tetapi hanya berupa perkiraan berdasarkan pengalaman yang dimiliki. Meskipun demikian, tindakan PM yang diberikan pada sistem tetap mempengaruhi deteriorasi sistem yang menjadi lebih lambat sehingga MTBF (*mean time between failure*) sistem menjadi lebih besar dibandingkan tidak adanya tindakan PM meskipun interval waktu yang diberikan belum optimal. Oleh karena itu, untuk mengetahui pengaruh T_0 terhadap fungsi laju hazard yang akan dibentuk terlebih dahulu ditentukan MTBF dari sistem sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \lambda(t) &= \frac{-dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \\
 \lambda(t)dt &= \frac{-dR(t)}{R(t)} \\
 \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} dt &= \frac{-dR(t)}{R(t)} \\
 \int_0^t \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t'}{\alpha}\right)^{\beta-1} dt' &= \int_{R(0)=1}^{R(t)} \frac{-dR(t')}{R(t')} \\
 \int_0^t \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t'}{\alpha}\right)^{\beta-1} dt' &= -\ln R(t) \Big|_{R(0)=1}^{R(t)} \\
 \int_0^t \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t'}{\alpha}\right)^{\beta-1} dt' &= -\ln R(t) + \ln 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\ln R(t) &= - \int_0^t \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t'}{\alpha} \right)^{\beta-1} dt' \\
R(t) &= \exp \left(- \int_0^t \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t'}{\alpha} \right)^{\beta-1} dt' \right) \\
&= \exp \left(- \int_0^t \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\beta-1} (t')^{\beta-1} dt' \right) \\
&= \exp \left(- \left(\int_0^t \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\beta} \beta (t')^{\beta-1} dt' \right) \right) \\
&= \exp \left(- \left(\frac{\beta}{\alpha^{\beta}} \int_0^t (t')^{\beta-1} dt' \right) \right) \\
&= \exp \left(- \left(\frac{\beta}{\alpha^{\beta}} \left[\frac{1}{\beta} (t')^{\beta} \right]_0^t \right) \right) \\
&= \exp \left(- \left(\frac{t^{\beta}}{\alpha^{\beta}} \right) \right) \\
&= \exp \left(- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right) \tag{4.4}
\end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan 4.4 dapat diperoleh fungsi probabilitas kepadatan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
f(t) &= - \frac{dR(t)}{dt} \\
&= \frac{-d \left(\exp \left(- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right) \right)}{dt} \\
&= - \exp \left(- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right) \frac{d \left(- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right)}{dt}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right)\left(-\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}\right) \\
&= \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right)
\end{aligned} \tag{4.5}$$

Berdasarkan definisi MTBF dan persamaan 4.5, diperoleh persamaan MTBF untuk sistem yang berdistribusi Weibull sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
MTBF &= \int_0^\infty tf(t)dt \\
&= \int_0^\infty \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp\left(-\frac{t}{\alpha}\right)^\beta tdt
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Misalkan

$$\begin{aligned}
u &= \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \longrightarrow du = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} dt \\
t &= \alpha u^{1/\beta}
\end{aligned}$$

Berdasarkan pemisalan yang dilakukan, maka persamaan 4.6 dapat ditulis menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
MTBF &= \int_0^\infty \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp(-u)t\frac{du}{\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}} \\
&= \int_0^\infty \exp(-u)td u \\
&= \int_0^\infty \alpha u^{1/\beta}\exp(-u)du
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \alpha \int_0^{\infty} u^{1/\beta} \exp(-u) du \\
&= \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Berdasarkan persamaan 4.7 maka pernyataan yang telah diberikan sebelumnya dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

$$\alpha_{\infty} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \ll \left(\alpha_{\infty} + \frac{\gamma}{T_0}\right) \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right). \tag{4.8}$$

Semakin besar nilai α , maka semakin kecil laju hazard sistem sehingga semakin jarang dilakukan tindakan PM, yang mengindikasikan bahwa MTBF sistem semakin besar. Berdasarkan hubungan tersebut, maka untuk memperoleh fungsi $\alpha^*(T)$ digunakan pernyataan 4.8. Pada ruas kiri untuk fungsi $\alpha^*(T)$ tanpa adanya pengaruh T_0 dan untuk ruas kanan sebaliknya. Selanjutnya berdasarkan hal tersebut, maka persamaan 4.8 dapat dituliskan kemabali menjadi sebagai berikut:

$$\alpha_{\infty} \ll \frac{\gamma}{T_0}. \tag{4.9}$$

Untuk selanjutnya, perlu diperhatikan bahwa secara umum T_0 dianggap sebagai interval PM yang optimal dengan alasan untuk pertimbangan efisiensi biaya pemeliharaan yang akan dikeluarkan. Berdasarkan hal tersebut, maka memungkinkan bahwa T_0 tidak terlalu berbeda dengan interval PM yang secara umum akan dibentuk untuk mengoptimalkan biaya pemeliharaan. Berdasarkan hal tersebut dan persamaan 4.9, maka α_{∞} pada persamaan 4.3 dapat diabaikan sehingga diperoleh pendekatan persamaan yang baru, yaitu:

$$\alpha^*(T) = \frac{\gamma}{T}. \tag{4.10}$$

Dikarenakan data waktu kerusakan mengikuti distribusi Weibull dan interval PM T_0 memiliki pengaruh terhadap karakteristik waktu terjadinya kerusakan, maka parameter γ dapat diperoleh dari persamaan 4.10, yaitu $\gamma = \alpha T_0$. Substitusi γ pada persamaan 4.10 sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$\alpha^*(T) = \alpha \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (4.11)$$

Substitusi persamaan 4.11 ke persamaan 4.2 sehingga diperoleh persamaan untuk fungsi laju hazard sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \lambda(t, T) &= \frac{\beta}{\alpha \frac{T_0}{T}} \left(\frac{t}{\frac{T_0}{T}} \right)^{\beta-1} \\ &= \frac{T}{T_0} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\beta-1} \\ &= \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\beta} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Substitusi persamaan 4.12 ke persamaan 4.1 sehingga dapat diperoleh:

$$\begin{aligned} E[N(t)] &= \int_0^{NT} \lambda(t, T) dt \\ &= \int_0^{NT} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\beta} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} dt \\ &= \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\beta} \frac{\beta}{\alpha} \int_0^{NT} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{T}{T_0} \right)^\beta \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \Big|_0^{NT} \right) \\
&= \left(\frac{T}{T_0} \right)^\beta \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{NT}{\beta} \right)^\beta \right) \\
&= \frac{T^{2\beta} N^\beta}{(\alpha T_0)^\beta}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$E[N(t)]$ merupakan ekspektasi jumlah terjadinya kerusakan pada sistem setelah diberikan tindakan PM.

4.3 Estimasi Biaya *Downtime*

Setiap tindakan CM yang dilakukan menyebabkan sistem berada pada status *down* dan lama sistem dalam keadaan tersebut bersifat acak. Secara umum, ekspektasi dari *downtime* yang disebabkan oleh tindakan CM adalah lamanya waktu perbaikan rata-rata dikalikan dengan ekspektasi jumlah kerusakan selama periode kontrak pemeliharaan.

Misalkan *downtime* sistem akibat tindakan CM ke- i dinyatakan sebagai T_i ($i = 1, 2, 3, \dots$). Diasumsikan bahwa T adalah variabel acak yang berdistribusi Weibull yang menyatakan waktu perbaikan atau lama *downtime* untuk suatu kerusakan sehingga rata-rata lama *downtime* dapat dinyatakan sebagai rata-rata waktu lamanya proses perbaikan pada sistem atau sama dengan persamaan 4.7.

Dengan demikian, ekspektasi total lama *downtime* akibat tindakan CM adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
E[D_{CM}] &= MTTR \cdot E[N(t)] \\
&= \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \int_0^{NT} \lambda(t, T) dt
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \int_0^{NT} \left(\frac{T}{T_0} \right)^\beta \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} dt \\
&= \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^\beta \frac{\beta}{\alpha} \int_0^{NT} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} dt \\
&= \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^\beta \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \Big|_0^{NT} \right) \\
&= \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^\beta \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{NT}{\alpha} \right)^\beta \right) \\
&= \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T^{2\beta} N^\beta}{(\alpha T_0)^\beta}.
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Selain tindakan CM, tindakan PM juga menyebabkan adanya *downtime* pada sistem, namun lama sistem dalam keadaan tersebut adalah konstan. Jika D_{PM} adalah total lama sistem berada pada keadaan *down* yang disebabkan oleh tindakan pemeliharaan pencegahan selama periode pemeliharaan berlangsung dan p merupakan *downtime* untuk tiap tindakan PM yang dilakukan, maka D_{PM} dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E[D_{PM}] = Np \tag{4.15}$$

Berdasarkan persamaan 4.14 dan 4.15, maka total lama sistem berada dalam keadaan *downtime* adalah

$$\begin{aligned}
E[D_T] &= E[D_{CM}] + [D_{PM}] \\
&= \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T^{2\beta} N^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + Np
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Berdasarkan persamaan 4.16, maka biaya kerugian akibat

adanya *downtime* diberikan oleh persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 C_D &= C_L E[D_T] \\
 &= C_L \left(\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T^{2\beta} N^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + Np \right)
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

dengan C_L adalah biaya kerugian untuk tiap *downtime* dalam satuan jam.

4.4 Estimasi Biaya Pemeliharaan per Unit Waktu

Berdasarkan kebijakan kontrak pemeliharaan yang telah ditentukan selanjutnya model estimasi total biaya pemeliharaan selama kontrak berlangsung dapat dibentuk dengan asumsi sebagai berikut:

1. Tindakan PM berada pada interval konstan
2. Biaya yang ditimbulkan akibat tindakan PM dan CM sudah termasuk biaya tenaga kerja
3. Semua faktor biaya adalah konstan selama periode kontrak berlangsung.

Biaya pemeliharaan selama kontrak berlangsung merupakan biaya langsung yang harus dikeluarkan oleh perusahaan selama proses produksi berlangsung. Dalam tugas akhir ini, biaya total pemeliharaan selama kontrak didefinisikan sebagai berikut:

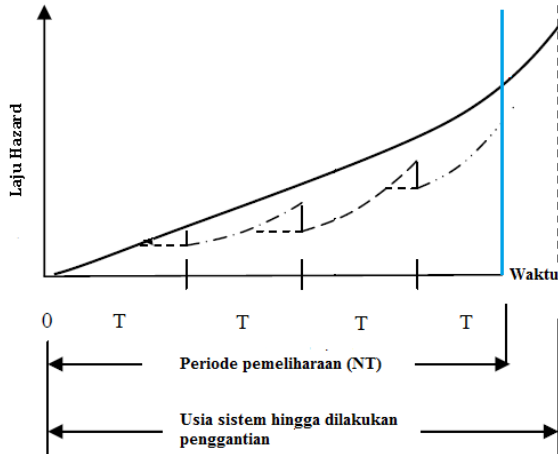
$$C_T = C_{PM} + C_R + C_D + C_{MR} \tag{4.18}$$

dengan,

- C_T : biaya total pemeliharaan
- C_{PM} : biaya pemeliharaan pencegahan
- C_R : biaya penggantian
- C_D : biaya *downtime*
- C_{MR} : biaya perbaikan minimal.

4.4.1 Estimasi Biaya Pemeliharaan Kebijakan 1

Pada kebijakan ini, tindakan pemeliharaan yang diterapkan pada sistem hanya berupa tindakan PM dan perbaikan minimal.



Keterangan:

- : laju hazard setelah PM pertama ($\lambda_1(t)$)
- - - - - : laju hazard setelah PM kedua ($\lambda_2(t)$)
- : laju hazard setelah PM ketiga ($\lambda_3(t)$)

Gambar 4.4: Grafik kebijakan kontrak pemeliharaan 1

Pada Gambar 4.4 menunjukkan adanya penurunan laju hazard dari sistem setelah diberikan beberapa kali tindakan PM. Diasumsikan bahwa usia sistem lebih lama dibandingkan kemungkinan terjadinya kerusakan pada sistem yang membutuhkan tindakan penggantian [10]. Oleh karena itu, tindakan penggantian tidak termasuk dalam kesepakatan kontrak sehingga biaya pemeliharaan pada kebijakan 1 hanya terdiri dari biaya tindakan PM, perbaikan minimal, dan *downtime*. Untuk sistem yang berada pada siklus *infant*

mortality, tidak dibutuhkan tindakan PM yang terlalu banyak sehingga diberikan batasan untuk lama *downtime* akibat tindakan PM selama satu periode kebijakan berlangsung. Berdasarkan persamaan 2.1 dan persamaan 4.18, maka biaya per unit waktu untuk kebijakan pemeliharaan 1 adalah sebagai berikut:

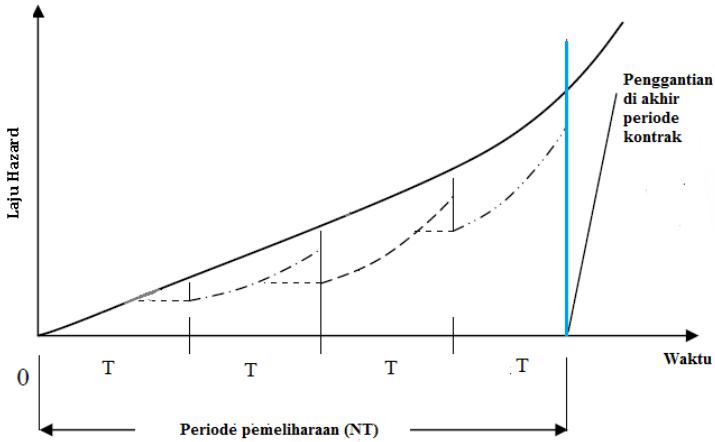
$$\begin{aligned}
 C_1(N_1, T_1) &= \frac{C_{Total_1}}{N_1 T_1} \\
 &= \frac{(N_1 - 1)C_{PM} + C_{MR} \frac{T_1^{2\beta} N_1^\beta}{(\alpha T_0)^\beta}}{N_1 T_1} \\
 &\quad + \frac{C_L \left(\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_1^{2\beta} N_1^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + p \right)}{N_1 T_1}
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

4.4.2 Estimasi Biaya Pemeliharaan Kebijakan 2

Pada kebijakan pemeliharaan 2, tindakan penggantian hanya dilakukan satu kali selama periode kontrak berlangsung. Waktu optimal penggantian berada pada akhir periode pemeliharaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 yaitu ketika mencapai t_N [10]. Berdasarkan pertimbangan tersebut, maka estimasi biaya pemeliharaan per unit waktu untuk kebijakan pemeliharaan 2 berdasarkan persamaan 2.1 dan persamaan 4.18 adalah sebagai berikut:

$$C_2(N_2, T_2) = \frac{C_{Total_2}}{N_2 T_2}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(N_2 - 1)C_{PM} + C_R + C_{MR} \frac{T_2^{2\beta} N_2^\beta}{(\alpha T_0)^\beta}}{N_2 T_2} \\
&\quad + \frac{C_L \left(\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_2^{2\beta} N_2^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + N_2 p \right)}{N_2 T_2}
\end{aligned} \tag{4.20}$$



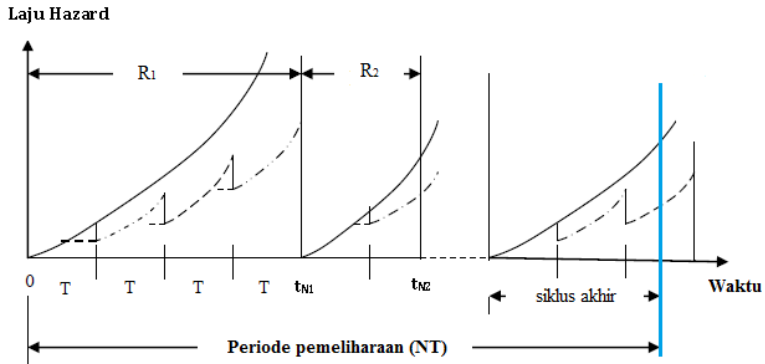
Gambar 4.5: Grafik kebijakan kontrak pemeliharaan 2

4.4.3 Estimasi Biaya Pemeliharaan Kebijakan 3

Pada kebijakan ini, penyedia jasa pemeliharaan memberikan tindakan penggantian ketika sistem mengalami kerusakan yang membutuhkan tindakan *replacement* atau penggantian selama periode kontrak yang telah disepakati.

Berdasarkan pada Gambar 4.6 dapat diketahui bahwa tindakan penggantian dapat terjadi di interval berapapun selama periode kontrak [10].

Tindakan penggantian yang dilakukan disumsikan menyebabkan laju hazard sistem kembali ke nol atau sistem dalam keadaan seperti baru. Diantara tindakan penggantian yang dilakukan berturut-turut tetap memungkinkan terjadinya perbaikan minimal akibat adanya kerusakan pada komponen.



Gambar 4.6: Grafik kebijakan kontrak pemeliharaan 3

Pada kebijakan pemeliharaan 3, sebelum penggantian terdapat minimal satu atau lebih pemeliharaan pencegahan dan perbaikan minimal. Berdasarkan hal tersebut, periode kontrak kebijakan pemeliharaan 3 berakhir akan bernilai optimal setelah dilakukan beberapa tindakan penggantian atau $R_i \leq NT$.

Pada akhir periode, diantara penggantian terakhir dan akhir periode terdapat periode singkat yang disebut sebagai siklus akhir (*last cycle*) dari sistem. Diasumsikan

bahwa karakteristik dari biaya yang timbul akibat tindakan pemeliharaan di siklus akhir sama dengan karakteristik biaya pada kebijakan pemeliharaan 1. Berdasarkan hal tersebut, total biaya pemeliharaan per unit waktu untuk kontrak pemeliharaan 3 berdasarkan persamaan 2.1 dan persamaan 4.18 adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 C_3(N_3, T_3) &= \frac{C_{Total3}}{N_3 T_3} \\
 &= \frac{M(N_3 - 1)C_{PM} + MC_R + M \left(C_{MR} \frac{T_3^{2\beta} N_3^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \right)}{N_3 T_3} \\
 &\quad + \frac{MC_L \left(\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_3^{2\beta} N_3^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + N_3 p \right) + C_{LC}}{N_3 T_3}
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

dengan M adalah jumlah tindakan penggantian yang dilakukan dan C_{LC} adalah total biaya selama siklus akhir yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 C_{CL} &= (N_{LC} - 1)C_{PM} + \left(C_{MR} \frac{T_{LC}^{2\beta} N_{LC}^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \right) \\
 &\quad + C_L \left(\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_{LC}^{2\beta} N_{LC}^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + N_{LC} p \right)
 \end{aligned}$$

4.5 PM Periodik Optimal

Setelah estimasi biaya untuk tiap kontrak pemeliharaan terbentuk, selanjutnya dilakukan penentuan interval PM (T) dan jumlah tindakan PM (N) yang optimal untuk meminimalkan biaya pemeliharaan yang harus dikeluarkan.

Penentuan T^* dan N^* dilakukan dengan menentukan solusi dari sistem persamaan berikut:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_i(N_i, T_i)}{\partial T_i} = 0 \\ \frac{\partial C_i(N_i, T_i)}{\partial N_i} = 0 \end{cases}$$

4.5.1 Kebijakan Pemeliharaan 1 Optimal

Berdasarkan persamaan 4.19 dapat diperoleh biaya pemeliharaan per unit waktu untuk kebijakan pemeliharaan 1 yang disederhanakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} C_1(N_1, T_1) &= \frac{C_{Total_1}}{N_1 T_1} \\ &= \frac{(N_1 - 1)C_{PM} + C_{MR} \frac{T_1^{2\beta} N_1^\beta}{(\alpha T_0)^\beta}}{N_1 T_1} \\ &\quad + \frac{C_L \left(\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_1^{2\beta} N_1^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + p \right)}{N_1 T_1} \\ &= \frac{C_{PM}}{T_1} + \frac{C_L p - C_{PM}}{N_1 T_1} + C_{MR} \frac{T_1^{2\beta-1} N_1^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \\ &\quad + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_1^{2\beta-1} N_1^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \end{aligned} \tag{4.22}$$

dengan $\beta > 1$ dan $C_{LP} > C_{PM}$. Penyelesaian nilai N_1^* dan T_1^* untuk persamaan 4.22 diberikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
0 &= \frac{\partial C_1(N_1, T_1)}{\partial N_1} \\
0 &= \frac{C_{PM} - C_{LP}}{N_1^2 T_1} + (\beta - 1) C_{MR} \frac{T_1^{2\beta-1} N_1^{\beta-2}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
&\quad + (\beta - 1) C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_1^{2\beta-1} N_1^{\beta-2}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
0 &= \frac{C_{PM} - C_{LP}}{N_1^2 T_1} \\
&\quad + (\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_1^{2\beta-1} N_1^{\beta-2}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
0 &= \left(\frac{C_{PM} - C_{LP}}{T_1} \right. \\
&\quad \left. + (\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_1^{2\beta-1} N_1^{\beta}}{(\alpha T_0)^\beta} \right) N_1^{-2}
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Berdasarkan persamaan 4.23, maka dapat diperoleh nilai N_1 yang memenuhi, yaitu:

$$\begin{aligned}
0 &= \frac{C_{PM} - C_{LP}}{T_1} \\
&\quad + (\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_1^{2\beta-1} N_1^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \\
\frac{C_{LP} - C_{PM}}{T_1} &= (\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_1^{2\beta-1} N_1^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \\
N_1^\beta &= \frac{(C_{LP} - C_{PM}) (\alpha T_0)^\beta}{(\beta - 1) T_1^{2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)}
\end{aligned} \tag{4.24}$$

$$\begin{aligned}
0 &= \frac{\partial C_1(N_1, T_1)}{\partial T_1} \\
0 &= -\frac{C_{PM}}{T_1^2} + \frac{C_{PM} - C_{LP}}{N_1 T_1^2} + (2\beta - 1) C_{MR} \frac{T_1^{2\beta-2} N_1^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
&\quad + (2\beta - 1) C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_1^{2\beta-2} N_1^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
0 &= \left(-C_{PM} + \frac{C_{PM} - C_{LP}}{N_1} \right) T_1^{-2} \\
&\quad + (2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{N_1^{\beta-1} T_1^{2\beta-2}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
0 &= \left(-C_{PM} + \frac{C_{PM} - C_{LP}}{N_1} \right. \\
&\quad \left. + (2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{N_1^{\beta-1} T_1^{2\beta}}{(\alpha T_0)^\beta} \right) T_1^{-2}
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Dari persamaan 4.25, dapat diperoleh nilai T_1 yang memenuhi yaitu:

$$\begin{aligned}
0 &= -C_{PM} + \frac{C_{PM} - C_{LP}}{N_1} + (2\beta - 1) \\
&\quad \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{N_1^{\beta-1} T_1^{2\beta}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
C_{PM} &= (2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \\
&\quad + \frac{C_{LP} - C_{PM}}{N_1} \frac{N_1^{\beta-1} T_1^{2\beta}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
T_1^{2\beta} &= \left(C_{PM} + \frac{C_{LP} - C_{PM}}{N_1} \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_1 &= \frac{(\alpha T_0)^\beta}{(2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) N_1^{\beta-1}} \left(C_{PM} + \frac{C_{LP} - C_{PM}}{N_1} \right)^{1/2\beta} \\
&\quad \frac{(\alpha T_0)^{1/2}}{(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta} N_1^{1/2-1/2\beta}}
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Selanjutnya substitusi persamaan 4.26 ke persamaan 4.24 sehingga diperoleh N_1^* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
N_1^\beta &= \frac{(C_{LP} - C_{PM}) (\alpha T_0)^\beta (2\beta - 1)}{(\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)} \\
&\quad \frac{N_1^{\beta-1} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)}{(\alpha T_0)^\beta \left(C_{PM} + \frac{C_{LP} - C_{PM}}{N_1} \right)} \\
N_1 &= \frac{(C_{LP} - C_{PM}) (2\beta - 1)}{(\beta - 1) \left(C_{PM} + \frac{C_{LP} - C_{PM}}{N_1} \right)} \\
N_1 &= \frac{(C_{LP} - C_{PM}) (2\beta - 1)}{(\beta - 1) (C_{PM}) + (\beta - 1) \frac{C_{LP} - C_{PM}}{N_1}} \\
N_1 (\beta - 1) C_{PM} &= (2\beta - 1) (C_{LP} - C_{PM}) - (\beta - 1) \\
&\quad (C_{LP} - C_{PM}) \\
&= \beta (C_{LP} - C_{PM})
\end{aligned}$$

$$N_1^* = \frac{C_{LP} - C_{PM}}{C_{PM}} \frac{\beta}{\beta - 1} \quad (4.27)$$

dan substitusi persamaan 4.27 ke persamaan 4.26 sehingga diperoleh T_1^* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{\left(C_{PM} + (C_{LP} - C_{PM}) \frac{C_{PM}}{C_{LP} - C_{PM}} \frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \\
 &\quad \frac{1}{(2\beta - 1)^{1/2\beta} N_1^{1/2-1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta}} \\
 &= \frac{\left(C_{PM} + C_{PM} \frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \frac{1}{(2\beta - 1)^{1/2\beta}} \\
 &\quad \frac{1}{N_1^{1/2-1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta}} \\
 &= \frac{\left(C_{PM} + \left(1 + \frac{\beta - 1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \frac{1}{(2\beta - 1)^{1/2\beta}} \\
 &\quad \frac{1}{N_1^{1/2-1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta}} \\
 &= \frac{(C_{PM})^{1/2\beta}}{\left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta}} \left(\frac{\left(1 + \frac{\beta - 1}{\beta} \right)}{2\beta - 1} \right)^{1/2\beta} \\
 &\quad \sqrt{\alpha T_0} \left(\frac{C_{PM}}{C_{LP} - C_{PM}} \frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/2(1-1/\beta)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{(C_{PM})^{1/2\beta}}{\left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta}} \left(\frac{2\beta - 1}{\beta} \frac{1}{2\beta - 1}\right)^{1/2\beta} \\
&\quad \sqrt{\alpha T_0} \left(\frac{C_{PM}}{C_{LP} - C_{PM}} \frac{\beta - 1}{\beta}\right)^{1/2(1-1/\beta)} \\
T_1^* &= \left(\frac{C_{PM}}{\beta \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)}\right)^{1/2\beta} \\
&\quad \sqrt{\alpha T_0} \left(\frac{C_{PM}}{C_{LP} - C_{PM}} \frac{\beta - 1}{\beta}\right)^{1/2(1-1/\beta)}
\end{aligned} \tag{4.28}$$

4.5.2 Kebijakan Pemeliharaan 2 Optimal

Berdasarkan persamaan 4.20 dapat diperoleh biaya pemeliharaan per unit waktu untuk kebijakan pemeliharaan 2 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
C_2(N_2, T_2) &= \frac{C_{Total_2}}{N_2 T_2} \\
&= \frac{(N - 1)C_{PM} + C_R + C_{MR} \frac{T_2^{2\beta} N_2^\beta}{(\alpha T_0)^\beta}}{N_2 T_2} \\
&\quad + \frac{C_L \left(\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \frac{T_2^{2\beta} N_2^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + N_2 p\right)}{N_2 T_2} \\
&= \frac{C_{PM} + C_{LP}}{T_2} + \frac{C_R - C_{PM}}{N_2 T_2} \\
&\quad + \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right) \frac{T_2^{2\beta-1} N_2^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta}
\end{aligned} \tag{4.29}$$

dengan $\beta > 1$ dan $C_R > C_{PM}$, penyelesaian nilai N_2^* dan T_2^* untuk persamaan 4.29 diberikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{\partial C_2(N_2, T_2)}{\partial N_2} \\
 0 &= \frac{C_{PM} - C_R}{N_2^2 T_2} \\
 &\quad + (\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_2^{2\beta-1} N_2^{\beta-2}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
 0 &= \left(\frac{C_{PM} - C_R}{T_2} \right. \\
 &\quad \left. + (\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_2^{2\beta-1} N_2^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \right) N_2^{-2}
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

Berdasarkan persamaan 4.30, maka diketahui nilai N_2 yang memenuhi yaitu:

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{C_{PM} - C_R}{T_2} \\
 &\quad + (\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_2^{2\beta-1} N_2^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \\
 \frac{C_R - C_{PM}}{T_2} &= (\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_2^{2\beta-1} N_2^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \\
 N_2^\beta &= \frac{(C_R - C_{PM}) (\alpha T_0)^\beta}{(\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) T_2^{2\beta}}
 \end{aligned} \tag{4.31}$$

$$\begin{aligned}
0 &= \frac{\partial C_2(N_2, T_2)}{\partial T_2} \\
0 &= \frac{-C_{PM} - C_{LP}}{T_2^2} + \frac{C_{PM} - C_R}{N_2 T_2^2} \\
&\quad + (2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_2^{2\beta-2} N_2^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
0 &= \left(-C_{PM} - C_{LP} + \frac{C_{PM} - C_R}{N_2} \right. \\
&\quad \left. + (2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_2^\beta N_2^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \right) T_2^{-2}
\end{aligned} \tag{4.32}$$

Dari persamaan 4.32 dapat diperoleh nilai T_2 yang memenuhi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
0 &= -C_{PM} - C_{LP} + \frac{C_{PM} - C_R}{N_2} + (2\beta - 1) \\
&\quad \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_2^\beta N_2^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
C_{PM} + C_{LP} &= (2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \\
+ \frac{C_R - C_{PM}}{N_2} &\quad \frac{T_2^\beta N_2^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
T_2^\beta &= \frac{\left(C_{PM} + C_{LP} + \frac{C_R - C_{PM}}{N_2} \right)}{(\alpha T_0)^\beta} \\
&\quad \frac{1}{(2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) N_2^{\beta-1}}
\end{aligned}$$

$$T_2 = \frac{\left(C_{PM} + C_{LP} + \frac{C_R - C_{PM}}{N_2}\right)^{1/2\beta} (\alpha T_0)^{1/2}}{(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta} N_2^{1/2-1/2\beta}} \quad (4.33)$$

Selanjutnya untuk memperoleh nilai optimum dari N_2 secara umum, substitusi persamaan 4.33 ke persamaan 4.31 sehingga diperoleh N_2^* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} N_2^\beta &= \frac{(C_R - C_{PM}) (\alpha T_0)^\beta (2\beta - 1)}{(\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)} \\ &\quad \frac{\left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right) N_2^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta \left(C_{PM} + C_{LP} + \frac{C_R - C_{PM}}{N_2}\right)} \\ &= \frac{(C_R - C_{PM}) (2\beta - 1) N_2^{\beta-1}}{(\beta - 1) \left(C_{PM} + C_{LP} + \frac{C_R - C_{PM}}{N_2}\right)} \\ N_2 &= \frac{(C_R - C_{PM}) (2\beta - 1)}{(\beta - 1) (C_{PM} + C_{LP}) + (\beta - 1) \frac{C_R - C_{PM}}{N_2}} \\ N_2 (\beta - 1) &= \frac{2\beta C_R - C_R - 2\beta C_{PM} + C_{PM} - \beta C_R}{(C_{PM} + C_{LP}) + C_R + \beta C_{PM} - C_{PM}} \\ &= \frac{\beta (C_R - C_{PM})}{(C_{PM} + C_{LP}) + C_R + \beta C_{PM} - C_{PM}} \\ N_2^* &= \frac{C_R - C_{PM}}{C_{PM} + C_{LP}} \frac{\beta}{\beta - 1} \end{aligned} \quad (4.34)$$

dan substitusi persamaan 4.34 ke persamaan 4.33 sehingga diperoleh T_2^* sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
T_2 &= \frac{\left(C_{PM} + C_{LP} + \frac{(C_R - C_{PM})(C_{PM} + C_{LP})}{C_R - C_{PM}} \frac{\beta - 1}{\beta}\right)^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \\
&\quad \frac{(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta} N_2^{1/2-1/2\beta}}{(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta} N_2^{1/2-1/2\beta}} \\
&= \frac{\left(C_{PM} + C_{LP} + (C_{PM} + C_{LP}) \frac{\beta - 1}{\beta}\right)^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \frac{1}{(2\beta - 1)^{1/2\beta}} \\
&\quad \frac{(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta} N_2^{1/2-1/2\beta}}{(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta} N_2^{1/2-1/2\beta}} \\
&= \frac{\left(C_{PM} + C_{LP} \left(1 + \frac{\beta - 1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \frac{1}{(2\beta - 1)^{1/2\beta}} \\
&\quad \frac{(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta} N_2^{1/2-1/2\beta}}{(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta} N_2^{1/2-1/2\beta}} \\
&= \frac{(C_{PM} + C_{LP})^{1/2\beta}}{\left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta}} \left(\frac{\left(1 + \frac{\beta - 1}{\beta}\right)}{2\beta - 1}\right)^{1/2\beta} \\
&\quad \sqrt{\alpha T_0} \left(\frac{C_{PM} + C_{LP}}{C_R - C_{PM}} \frac{\beta - 1}{\beta}\right)^{1/2(1-1/\beta)} \\
&= \frac{(C_{PM} + C_{LP})^{1/2\beta}}{\left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^{1/2\beta}} \left(\frac{2\beta - 1}{\beta} \frac{1}{2\beta - 1}\right)^{1/2\beta} \\
&\quad \sqrt{\alpha T_0} \left(\frac{C_{PM} + C_{LP}}{C_R - C_{PM}} \frac{\beta - 1}{\beta}\right)^{1/2(1-1/\beta)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_2^* &= \left(\frac{C_{PM}}{\beta \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)} \right)^{1/2\beta} \\
&\quad \sqrt{\alpha T_0} \left(\frac{C_{PM} + C_{LP} \beta - 1}{C_R - C_{PM}} \frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/2(1-1/\beta)}
\end{aligned} \tag{4.35}$$

4.5.3 Kebijakan Pemeliharaan 3 Optimal

Berdasarkan persamaan 4.21 diketahui persamaan pemeliharaan per unit waktu untuk kebijakan pemeliharaan 3 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
C_3(N_3, T_3) &= \frac{C_{Total_3}}{N_3 T_3} \\
&= \frac{M(N_3 - 1)C_{PM} + MC_R + MC_{MR} \frac{T_3^{2\beta} N_3^\beta}{(\alpha T_0)^\beta}}{N_3 T_3} \\
&\quad + \frac{MC_L \left(\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_3^{2\beta} N_3^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + N_3 p \right) + C_{LC}}{N_3 T_3} \\
&= \frac{M(C_{PM} + C_{LP})}{T_3} + \frac{M(C_R - C_{PM})}{N_3 T_3} + \frac{C_{LC}}{N_3 T_3} \\
&\quad + M \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_3^{2\beta-1} N_3^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta}
\end{aligned} \tag{4.36}$$

dengan $\beta > 1$ dan $C_R > C_{PM}$, penyelesaian nilai N_3^* dan T_3^* untuk persamaan 4.36 hampir sama dengan kebijakan

sebelumnya dan diberikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{\partial C_3(N_3, T_3)}{\partial N_3} \\
 0 &= \frac{M(C_{PM} - C_R) - C_{LC}}{N_3^2 T_3} \\
 &\quad + M(\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_3^{2\beta-1} N_3^{\beta-2}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
 0 &= \left(\frac{M(C_{PM} - C_R) - C_{LC}}{T_3} \right. \\
 &\quad \left. + M(\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_3^{2\beta-1} N_3^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \right) N_3^{-2}
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

Berdasarkan persamaan 4.37 dapat ditentukan nilai N_3 yang memenuhi adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{M(C_{PM} - C_R) - C_{LC}}{T_3} + M(\beta - 1) \\
 &\quad \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_3^{2\beta-1} N_3^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \\
 \frac{M(C_R - C_{PM})}{T_3} &= M(\beta - 1) (C_{MR} \\
 &\quad + \frac{C_{LC}}{T_3} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T_3^{2\beta-1} N_3^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} \\
 N_3^\beta &= \frac{(M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}) (\alpha T_0)^\beta}{M(\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) T_3^{2\beta}}
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

$$\begin{aligned}
0 &= \frac{\partial C_3(N_3, T_3)}{\partial T_3} \\
0 &= \frac{-M(C_{PM} + C_{LP})}{T_3^2} + \frac{M(C_{PM} - C_R) - C_{LC}}{N_3 T_3^2} \\
&\quad + M(2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_3^{2\beta-2} N_3^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
0 &= T_3^{-2} \left(-M(C_{PM} + C_{LP}) + \frac{M(C_{PM} - C_R) - C_{LC}}{N_3} \right. \\
&\quad \left. + M(2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_3^{2\beta} N_3^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \right)
\end{aligned} \tag{4.39}$$

Berdasarkan persamaan 4.39 diketahui hanya satu T_3 yang memenuhi, yaitu:

$$\begin{aligned}
0 &= -M(C_{PM} + C_{LP}) + \frac{M(C_{PM} - C_R) - C_{LC}}{N_3} \\
&\quad + M(2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_3^{2\beta} N_3^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} \\
&\quad M(2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) \frac{T_3^{2\beta} N_3^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta} = \\
&\quad M(C_{PM} + C_{LP}) + \frac{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}}{N_3} \\
T_3^{2\beta} &= \left(M(C_{PM} + C_{LP}) + \frac{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}}{N_3} \right) \\
&\quad \frac{(\alpha T_0)^\beta}{M(2\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) N_3^{\beta-1}}
\end{aligned}$$

$$T_3 = \frac{\left(M (C_{PM} + C_{LP}) + \frac{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}}{N_3} \right)^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \frac{1}{M (2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta} N_3^{1/2-1/2\beta}} \quad (4.40)$$

Untuk selanjutnya substitusi persamaan 4.40 ke persamaan 4.38 untuk memperoleh N_3^* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} N_3^\beta &= \frac{(M (C_R - C_{PM}) + C_{LC}) (\alpha T_0)^\beta M (2\beta - 1)}{M (\beta - 1) \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)} \\ &\quad \frac{\left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right) N_3^{\beta-1}}{(\alpha T_0)^\beta \left(M (C_{PM} + C_{LP}) + \frac{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}}{N_3} \right)} \\ N_3 &= \frac{(M (C_R - C_{PM}) + C_{LC}) M (2\beta - 1)}{M (\beta - 1) \left(M (C_{PM} + C_{LP}) + \frac{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}}{N_3} \right)} \\ &= \frac{1}{M^2(\beta - 1)(C_{PM} + C_{LP})} \left(-M^2(\beta - 1)(C_R - C_{PM}) \right. \\ &\quad \left. + M^2(2\beta - 1)(C_R - C_{PM}) - M(\beta - 1)C_{LC} \right. \\ &\quad \left. + M(2\beta - 1)C_{LC} \right) \\ &= \frac{1}{M^2(\beta - 1)(C_{PM} + C_{LP})} \left(MC_{LC} ((2\beta - 1) - (\beta - 1)) \right. \\ &\quad \left. + M^2(C_R - C_{PM}) ((2\beta - 1) - (\beta - 1)) \right) \\ &= \frac{1}{M^2(\beta - 1)(C_{PM} + C_{LP})} \left(M^2(C_R - C_{PM})\beta + MC_{LC}\beta \right) \\ &= \frac{1}{M^2(\beta - 1)(C_{PM} + C_{LP})} \left(\beta M (M (C_R - C_{PM}) + C_{LC}) \right) \end{aligned}$$

$$N_3^* = \frac{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}}{M(C_{PM} + C_{LP})} \frac{\beta}{\beta - 1} \quad (4.41)$$

Selanjutnya untuk memperoleh T_3^* substitusi persamaan 4.41 ke persamaan 4.40 sehingga diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{(M(C_{PM} + C_{LP}) + (M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}) \frac{M(C_{PM} + C_{LP})}{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}} \frac{\beta - 1}{\beta})^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \\ &= \frac{M(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta} N_3^{1/2-1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \\ &= \frac{\left(M(C_{PM} + C_{LP}) + M(C_{PM} + C_{LP}) \frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \\ &= \frac{M(2\beta - 1)^{1/2\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta} N_3^{1/2-1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \\ &= \frac{\left(M(C_{PM} + C_{LP}) \left(1 + \frac{\beta - 1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta}}{(\alpha T_0)^{1/2}} \frac{1}{M(2\beta - 1)^{1/2\beta}} \\ &= \frac{\left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)^{1/2\beta} N_3^{1/2-1/2\beta}}{\left(\frac{C_{PM} + C_{LP}}{C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)} \right)^{1/2\beta} \left(\frac{1 + \frac{\beta - 1}{\beta}}{2\beta - 1} \right)^{1/2\beta}} \\ &= M^{1/2\beta-1} (\alpha T_0)^{1/2} \left(\frac{M(C_{PM} + C_{LP})}{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}} \frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/2-1/2\beta} \end{aligned}$$

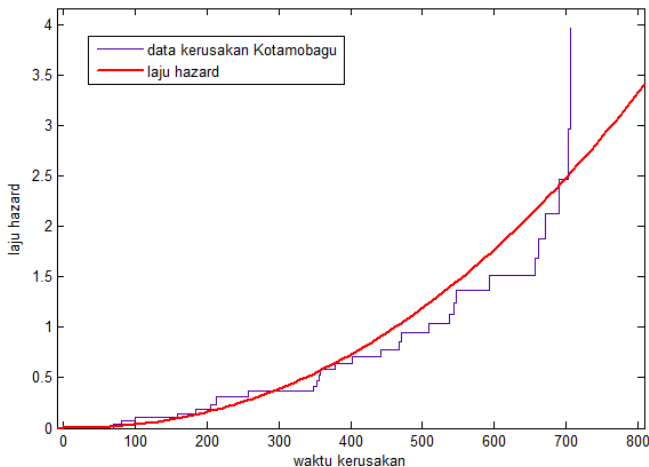
$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{C_{PM} + C_{LP}}{C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)} \right)^{1/2\beta} \left(\frac{2\beta - 1}{\beta} \frac{1}{2\beta - 1} \right)^{1/2\beta} \\
&\quad M^{1/2\beta-1} (\alpha T_0)^{1/2} \left(\frac{M(C_{PM} + C_{LP})}{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}} \frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/2-1/2\beta} \\
&= M^{1/2\beta-1} \left(\frac{C_{PM} + C_{LP}}{C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)} \right)^{1/2\beta} \left(\frac{1}{\beta} \right)^{1/2\beta} \\
&\quad (\alpha T_0)^{1/2} \left(\frac{M(C_{PM} + C_{LP})}{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}} \frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/2(1-1/\beta)} \\
T_3^* &= M^{1/2\beta-1} \left(\frac{C_{PM}}{\frac{1}{\beta} \left(C_{MR} + C_L \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right)} \right)^{1/2\beta} \\
&\quad (\alpha T_0)^{1/2} \left(\frac{M(C_{PM} + C_{LP})}{M(C_R - C_{PM}) + C_{LC}} \frac{\beta - 1}{\beta} \right)^{1/2(1-1/\beta)}
\end{aligned} \tag{4.42}$$

4.6 Studi Kasus

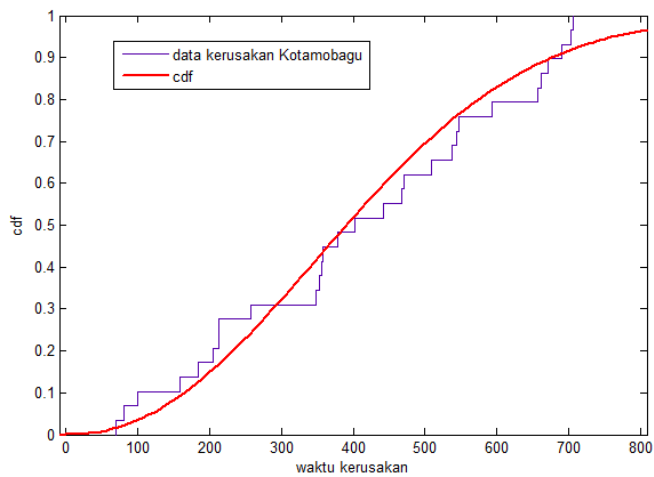
Diberikan beberapa contoh studi kasus perhitungan estimasi biaya pemeliharaan untuk tiap kebijakan berdasarkan data waktu terjadinya kerusakan jaringan distribusi listrik di area Kotamobagu pada bulan Oktober 2015 dalam bentuk jam yang dapat dilihat pada Lampiran A. Data kerusakan pada Lampiran A merupakan data kerusakan akibat kerusakan yang ditimbulkan oleh kubikel yang mempengaruhi kinerja gardu listrik yang berakibat pada pemadaman listrik pada konsumen.

Berdasarkan asumsi yang diberikan bahwa sistem

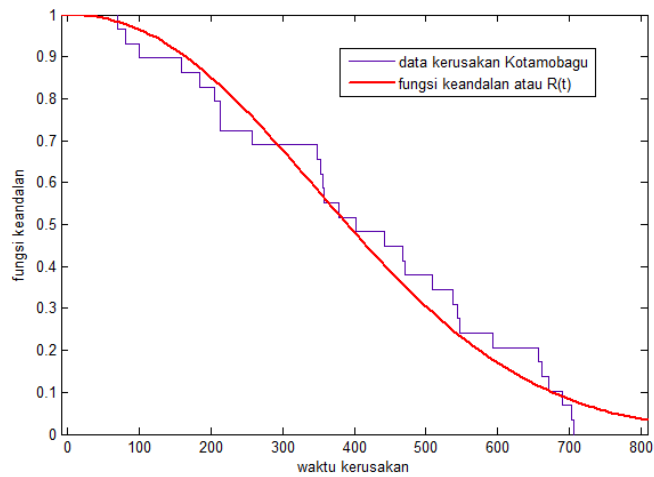
berdistribusi Weibull, untuk mengetahui apakah data yang digunakan telah mengikuti distribusi Weibull dilakukan uji Mann yang dapat dilihat pada Lampiran B. Berdasarkan uji yang dilakukan, data telah memenuhi kriteria uji sehingga dapat digunakan. Selanjutnya dilakukan estimasi parameter dengan metode *maximum likelihood estimation* (MLE) menggunakan MATLAB sehingga diperoleh nilai untuk setiap parameter berturut-turut, yaitu $\alpha = 461,994$ dan $\beta = 2,1894$. Nilai $\beta > 1$ menunjukkan bahwa sistem mengalami peningkatan laju hazard. Berdasarkan parameter tersebut dapat diperoleh nilai untuk fungsi hazard, cdf, dan keandalan untuk data kerusakan jaringan distribusi listrik area Kotamobagu yang dapat dilihat pada Lampiran C dengan grafik fungsinya berturut-turut pada Gambar 4.7, Gambar 4.8, dan Gambar 4.9.



Gambar 4.7: Plot fungsi laju hazard area Kotamobagu



Gambar 4.8: Plot distribusi komulatif area Kotamobagu



Gambar 4.9: Plot keandalan sistem area Kotamobagu

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa laju hazard sistem mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya usia dan penggunaan sistem. Sebaliknya, Gambar 4.9 menunjukkan bahwa diawal penggunaannya sistem dalam kondisi yang baik dengan nilai keandalan 1 dan terus mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya usia sistem. Gambar 4.8 menunjukkan probabilitas komulatif waktu terjadinya kerusakan sistem dengan $0 \leq F(t) \leq 1$.

Pada studi kasus ini, akan ditentukan nilai T^* , N^* , dan biaya optimal $C^*(N^*, T^*)$ untuk tiap kebijakan serta pengaruh perubahan parameter terhadap biaya optimal. Sebelum melakukan perhitungan, terlebih dahulu ditentukan nilai untuk tiap biaya yang mempengaruhi tiap kebijakan, yaitu sebagai berikut:

- C_{PM} : Rp. 50.000.000,00
- C_{MR} : Rp. 60.000.000,00
- C_R : Rp. 200.000.000,00
- C_L : Rp. 90.000.000,00
- T_0 : 1 kali tiap bulan
- p : 2 jam

Substitusi nilai parameter dan biaya yang diketahui pada persamaan untuk N^* dan T^* tiap kebijakan yang selanjutnya substitusi setiap nilai N^* dan T^* yang diperoleh untuk tiap kebijakan pada persamaan total biaya per unit waktu untuk tiap kebijakan.

Tabel 4.1: Biaya tiap kebijakan data area Kotamobagu

Kebijakan	N	T-hari	C(N,T)
1	1	107	Rp. 44.994.727,82
2	1	113	Rp. 99.808.558,43
3	1	67	Rp. Rp. 474.709.625,49

Pada Tabel 4.1 menunjukkan nilai optimal N dan T untuk setiap kebijakan. Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa setiap kebijakan memiliki nilai optimal N , T dan $C(N, T)$ yang berbeda-beda. Kebijakan 1 memiliki total biaya paling kecil meskipun nilai N dan T tidak lebih kecil dari kebijakan yang lain. Sebaliknya kebijakan 3 memiliki total biaya terbesar dengan T terkecil. Berdasarkan hal tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar nilai N dan semakin kecil nilai T menunjukkan bahwa semakin tinggi total biaya yang ditimbulkan akibat semakin seringnya tindakan PM dilakukan dalam interval waktu yang berdekatan.

Jika diberikan nilai $T^* = T_0$, berdasarkan Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa total biaya yang dikeluarkan lebih besar dibandingkan dengan menggunakan T^* . Dengan kata lain, interval PM yang diberikan sebelumnya meskipun berdasarkan pengalaman yang ada belum tentu merupakan nilai yang optimal. Nilai optimal N tidak berubah karena tidak dipengaruhi oleh berubahnya nilai T_0 .

Tabel 4.2: Biaya dengan $T = T_0$ untuk area Kotamobagu

Kebijakan	N	T-hari	$C(N, T_0)$
1	1	30	Rp. 138.364.434,15
2	1	30	Rp. 355.015.585,96
3	2	30	Rp. 1.065.122.473,28

Tabel 4.3: Biaya tanpa *downtime* area Kotamobagu

Kebijakan	N	T-hari	$C(N, T)$
1	2	438	Rp. 969.607.751,54
2	6	325	Rp. 1.319.356.328,77
3	17	145	Rp. 1.173.573.222,04

Pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa total biaya yang dikeluarkan selama kontrak pemeliharaan berlangsung tanpa adanya perhitungan biaya *downtime* lebih besar dibandingkan dengan adanya pertimbangan biaya *downtime*. Hal tersebut dikarenakan tambahan biaya akibat *downtime* hanya menjadi tanggungan bagi perusahaan pemilik sistem dan bukan termasuk dalam kesepakatan kontrak kebijakan PM. Untuk selanjutnya dilakukan uji pengaruh nilai parameter β terhadap kebijakan pemeliharaan.

Tabel 4.4: Pengaruh β untuk kebijakan 1

β	N	T-hari	C(N,T)
1,5	2	54	Rp. 76.565.648,94
2	2	92	Rp. 50.673.069,34
3,5	1	201	Rp. 26.842.588,78

Tabel 4.5: Pengaruh β untuk kebijakan 2

β	N	T-hari	C(N,T)
1,5	2	56	Rp. 182.987.922,27
2	1	97	Rp. 114.019.010,57
3,5	1	217	Rp. 56.528.958,74

Tabel 4.6: Pengaruh β untuk kebijakan 3

β	N	T-hari	C(N,T)
1,5	2	34	Rp. 828.772.469,91
2	1	59	Rp. 533.660.097,89
3,5	1	118	Rp. 299.708.666,22

Berdasarkan Tabel 4.4, 4.5, dan 4.6 dapat diketahui bahwa biaya total untuk $\beta = 1,5$ lebih besar dibandingkan dengan kasus sebelumnya dengan $\beta = 2,068$ karena sistem berada dalam keadaan IFR. Sedangkan untuk $\beta = 2$ dan $\beta = 3,5$

mengalami penurunan biaya total meskipun nilai β meningkat dikarenakan untuk $\beta = 2$ sistem akan berdistribusi Reyleigh yang setelah laju hazardnya mencapai puncak cenderung mengalami penurunan laju hazard sehingga jumlah tindakan PM juga semakin berkurang. Untuk $\beta = 3,5$ sistem hampir mendekati distribusi normal yang merupakan distribusi yang banyak digunakan untuk sistem dengan fenomena *fatigue* atau fungsi dari sistem yang mengalami penurunan secara drastis setelah mencapai penggunaan maksimal.

Penentuan penggunaan kebijakan pemeliharaan 1, 2, maupun 3 merupakan kesepakatan bersama antara pihak penyedia jasa pelayanan pemeliharaan dengan perusahaan pemilik aset yang akan dipelihara. Keseluruhan kebijakan yang dibentuk dapat diterapkan untuk sistem yang dalam masa pakai *infant mortality*, *useful life*, maupun *wear out*. Namun berdasarkan sifat yang dimiliki sistem, penggunaan untuk tiap kebijakan memiliki keuntungan dan kerugian untuk setiap keputusan pemilihan kebijakan yang diambil.

Sistem dengan kondisi *useful life* memiliki laju kerusakan yang konstan dan sangat rendah sehingga terjadinya kerusakan yang membutuhkan tindakan penggantian pada sistem hampir tidak pernah terjadi. Namun mendekati batas *wear out*, kerusakan semakin meningkat jika tidak dilakukan pemeliharaan yang tepat. Untuk mencegah adanya kerusakan di awal, maka perlu dilakukan tindakan PM yang terjadwal sehingga kemungkinan terjadinya kerusakan sistem yang kritis tidak akan terjadi pada periode ini. Penerapan kontrak kebijakan pemeliharaan 1 terhadap sistem yang demikian dapat memberikan keuntungan bagi perusahaan pemilik aset karena tidak perlu membayar lebih untuk tindakan penggantian yang memang seharusnya tidak perlu dilakukan. Namun bagi penyedia jasa pemeliharaan, penggunaan kontrak kebijakan pemeliharaan 2 dan 3 merupakan kebijakan

yang lebih memberikan keuntungan. Adanya tindakan penggantian yang dilakukan menyebabkan nilai kontrak akan lebih tinggi karena kemungkinan terjadinya kerusakan yang membutuhkan penggantian hampir tidak mungkin terjadi.

Tindakan penggantian merupakan salah satu tindakan pemeliharaan yang membutuhkan biaya tinggi. Memperhitungkan kemungkinan perlunya tindakan penggantian menjadi salah satu dasar dalam pengambilan keputusan kontrak. Sistem dalam keadaan *infant mortality* merupakan sistem baru yang dimulai dengan kemungkinan laju hazard yang tinggi di awal yang kemudian menurun secara drastis. Kemungkinan terjadinya kerusakan pada komponen kritis di awal sangat mungkin terjadi akibat beberapa aspek. Namun kerusakan yang terjadi hanya mungkin di awal, oleh karena itu penerapan kontrak kebijakan pemeliharaan 2 akan sangat menguntungkan bagi perusahaan. Jika perusahaan menggunakan kebijakan 1, maka untuk kerusakan yang akan terjadi tidak menjadi tanggung jawab bagi penyedia jasa pemeliharaan. Untuk melakukan tindakan penggantian perusahaan harus memberikan tambahan biaya yang cukup tinggi untuk pekerjaan tambahan yang dilakukan di luar kontrak. Namun jika perusahaan menggunakan kebijakan 3, perusahaan akan membayar lebih untuk tindakan penggantian yang sebenarnya tidak perlu dilakukan.

Kondisi *wear out* merupakan kondisi yang berada di akhir siklus sebuah sistem. Pada periode ini, laju hazard sistem terus mengalami peningkatan karena usia penggunaannya yang telah lama dan sistem telah aus. Kemungkinan terjadinya kerusakan yang menyeluruh dapat terjadi kapan saja pada periode ini. Adanya kesepakatan diberikannya tindakan penggantian untuk setiap kerusakan membuat kebijakan 3 sesuai digunakan untuk sistem dalam kondisi ini. Namun hal tersebut juga menjadi pertimbangan yang

cukup tinggi bagi pihak penyedia jasa pemeliharaan, apakah tindakan yang dilakukan sebanding dengan resiko yang diperoleh. Bagi pihak penyedia jasa, pemilihan kebijakan 2 dan 1 akan lebih menguntungkan karena jika terjadi kerusakan, perusahaan harus membayar lebih untuk tindakan penggantian yang tidak disepakati dalam kontrak.

LAMPIRAN A
Data Kerusakan Jaringan Distribusi Listrik Area
Kotamobagu Oktober 2015

Tanggal	Padam	Nyala	t_i	MTBF awal
03/10/2015	22.09	23.03	70.09	12.10
04/10/2015	10.19	11.46	82.19	18.44
05/10/2015	05.03	07.01	101.03	59.07
07/10/2015	16.10	19.08	160.10	24.20
08/10/2015	22.30	22.46	184.30	21.13
09/10/2015	13.43	15.52	205.43	08.14
09/10/2015	21.57	22.06	213.57	00.11
09/10/2015	22.08	22.16	214.08	43.07
11/10/2015	17.15	19.20	257.15	91.10
15/10/2015	12.25	12.46	348.25	04.05
15/10/2015	16.30	18.48	352.30	03.30
15/10/2015	20.10	21.58	356.10	01.06
15/10/2015	21.16	21.46	357.16	00.53
16/10/2015	18.09	23.21	378.09	24.34
17/10/2015	18.43	23.24	402.43	39.41
19/10/2015	10.24	10.29	442.24	24.32
20/10/2015	08.58	09.25	466.58	03.00
20/10/2015	11.58	13.03	469.58	39.22
21/10/2015	19.20	20.17	509.20	28.37
23/10/2015	09.57	10.52	537.57	06.03
23/10/2015	16.10	22.01	544.10	02.40
23/10/2015	18.50	22.10	546.50	46.41
25/10/2015	17.31	19.31	593.31	62.06

Lanjutan Lampiran A

Tanggal	Padam	Nyala	t_i	MTBF awal
28/10/2015	07.37	08.11	655.37	06.17
28/10/2015	13.54	14.03	661.54	08.06
28/10/2015	22.00	22.13	670.00	20.25
29/10/2015	18.25	19.39	690.25	12.32
30/10/2015	06.57	07.03	702.57	02.23
30/10/2015	09.20	12.57	705.20	

LAMPIRAN B
Uji Mann Data Kerusakan Jaringan Distribusi
Listrik Area Kotamobagu

No.	t_i	$\ln t_i$	z_i	M_i	$\ln t_{i+1} - \ln t_i$	$\frac{\ln t_{i+1} - \ln t_i}{M_i}$
1	70,15	4,250	-4,043	1,116	0,159938197	0,143246351
2	82,31	4,410	-2,926	0,529	0,205041441	0,38738651
3	101,05	4,615	-2,397	0,355	0,460599704	1,295511825
4	160,16	5,076	-2,041	0,271	0,141434316	0,521870468
5	184,50	5,217	-1,771	0,221	0,108850516	0,492412376
6	205,71	5,326	-1,549	0,188	0,039242363	0,208538523
7	213,95	5,365	-1,361	0,165	0,000856375	0,005189382
8	214,13	5,366	-1,196	0,147	0,184097454	1,244275811
9	257,41	5,550	-1,048	0,134	0,302703005	2,242822202
10	348,41	5,853	-0,913	0,124	0,011651445	0,093315727
11	352,50	5,865	-0,788	0,116	0,010348257	0,088529523
12	356,16	5,875	-0,671	0,111	0,003083682	0,027890595
13	357,26	5,878	-0,561	0,105	0,056808381	0,538217813
14	378,15	5,935	-0,455	0,101	0,062942395	0,61937261
15	402,71	5,998	-0,353	0,098	0,093981113	0,952817014
16	442,40	6,092	-0,255	0,096	0,054043499	0,560082928
17	466,96	6,146	-0,158	0,095	0,006403892	0,067305438
18	469,96	6,152	-0,063	0,094	0,080440774	0,850358665
19	509,33	6,233	0,030	0,094	0,054663003	0,576095221
20	537,95	6,287	0,125	0,096	0,011490015	0,119539886
21	544,16	6,299	0,221	0,098	0,004888369	0,049634767
22	546,83	6,304	0,320	0,102	0,081921349	0,800657258
23	593,51	6,386	0,422	0,108	0,099510922	0,91984401
24	655,61	6,485	0,530	0,117	0,009538213	0,081430273

Lanjutan Lampiran B

No.	t_i	$\ln t_i$	z_i	M_i	$\ln t_{i+1} - \ln t_i$	$\frac{\ln t_{i+1} - \ln t_i}{M_i}$
25	661,90	6,495	0,648	0,131	0,012163225	0,09262685
26	670,00	6,507	0,779	0,155	0,030017616	0,192572474
27	690,41	6,537	0,935	0,207	0,017990437	0,086662123
28	702,95	6,555	1,142	0,414	0,003384692	0,008169854
29	705,33	6,558	1,557			

Hipotesis:

H_0 : Data berdistribusi Weibull

H_1 : Data tidak berdistribusi Weibull

Kriteria uji:

$$\begin{aligned}
 M &< F_{\alpha; 2k_2; 2k_1} \\
 0,701661593 &< F_{(0,05; 28; 29)} \\
 0,701661593 &< 1,85
 \end{aligned}$$

Karena memenuhi kriteria uji, maka H_0 diterima.

LAMPIRAN C
Fungsi Hazard, CDF, dan keandalan Data
Kerusakan Jaringan Distribusi Listrik Area
Kotamobagu

No.	t_i	$\lambda(t)$	$R(t)$	$F(t)$
1	70,1500	0,0005	0,984	0,016
2	82,3167	0,00061	0,97736	0,02264
3	101,0500	0,00078	0,96476	0,03524
4	160,1667	0,00134	0,90634	0,09366
5	184,5000	0,00159	0,87456	0,12544
6	205,7167	0,00181	0,84358	0,15642
7	213,9500	0,0019	0,8308	0,1692
8	214,1333	0,0019	0,83051	0,16949
9	257,4167	0,00236	0,75737	0,24263
10	348,4167	0,00339	0,58324	0,41676
11	352,5000	0,00344	0,57517	0,42483
12	356,1667	0,00348	0,56793	0,43207
13	357,2667	0,00349	0,56575	0,43425
14	378,1500	0,00373	0,52464	0,47536
15	402,7167	0,00402	0,47695	0,52305
16	442,4000	0,0045	0,40273	0,59727
17	466,9667	0,0048	0,35926	0,64074
18	469,9667	0,00484	0,3541	0,6459
19	509,3333	0,00532	0,28993	0,71007
20	537,9500	0,00568	0,24771	0,75229
21	544,1667	0,00576	0,23906	0,76094
22	546,8333	0,00579	0,2354	0,7646
23	593,5167	0,00638	0,17718	0,82282
24	655,6167	0,00719	0,11627	0,88373

Lanjutan Lampiran C

No.	t	$\lambda(t)$	$R(t)$	$F(t)$
25	661,9000	0,00727	0,1111	0,8889
26	670,0000	0,00737	0,10471	0,89529
27	690,4167	0,00764	0,08983	0,91017
28	702,9500	0,00781	0,08154	0,91846
29	705,3333	0,00784	0,08003	0,91997

BAB V PENUTUP

Pada bab ini, diberikan kesimpulan yang diperoleh dari tugas akhir serta saran untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah disajikan pada bab sebelumnya diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Terdapat tiga kebijakan PM yang dapat digunakan, yaitu kebijakan 1, 2, dan 3. Dari studi kasus yang dilakukan diperoleh total biaya pemeliharaan per unit waktu untuk setiap kebijakan berturut-turut adalah Rp. 44.994.727,82, Rp. 99.108.558,43, dan Rp. 474.709.625,49.
2. Adanya penambahan biaya *downtime* menyebabkan berkurangnya estimasi total biaya kebijakan PM yang dikeluarkan perusahaan karena telah diperhitungkan dalam pengambilan keputusan penentuan N dan T optimal. Total biaya *downtime* diberikan sebagai berikut:

$$C_D = C_L \left(\alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \frac{T^{2\beta} N^\beta}{(\alpha T_0)^\beta} + Np \right).$$

5.2 Saran

Pada tugas akhir ini kebijakan yang digunakan merupakan kebijakan PM periodik dengan analisa hanya pada kerusakan

kubikel. Oleh sebab itu, penulis menyarankan agar penelitian dapat dilanjutkan pada perluasan kebijakan PM periodik dengan analisa pengaruh lingkungan dan kesalahan manusia serta penerapan kebijakan PM sekuensial.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C.L. Melchor-Hernandez, F. Rivas-Davalos, S. Maximov, V.H. Coria, and J.L. Guardado, "A Model for Optimazing Maintenance Policy for Power Equipment," *Electrical Power and Energy Systems*, No.68 (2015) 304-312.
- [2] V.H. Coria, S. Maximov, F. Rivas-Davalos, C.L. Melchor-Hernandez, and J.L. Guardado, "Analytical Method for Optimization of Maintenance Policy Based on Available System Failure Data," *Reliability Engineering and System Safety*, No. 135 (2015) 55-63.
- [3] Mulyadi, *Akutansi Biaya Edisi ke-3*, Yogyakarta: Aditya Media UGM (1999).
- [4] W.J. Fabrycky and B.S. Blanchard, *Life-Cycle Cost and Economic Analysis*, New Jersey: Prentice Hall (1991).
- [5] T. Nakagawa, "Periodic and Sequential Preventive Mintenance Policy," *Journal Application Probability*, No. 23 (1986) 536-542.
- [6] C.E. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, Singapura: McGraw-Hill Companies (1997).
- [7] S. Sheu and C. Chaag, "An Extended Periodic Imperfect Preventive Maintenance Model With Age-Dependent Failure Type," *IEEE Trans. On Reliability*, Vol.2, No. 58 (2009) 397-405.

- [8] D.N.P. Murthy and N. Jack, *Warranty and Maintenance*, Springer-Verlag, London (2000) 305316.
- [9] H. Saputra," Penentuan Prioritas Pemeliharaan Berdasarkan Indeks Keandalan pada Sitem Distribusi Listrik Bandar Udara Soekarno-Hatta," belum dipublikasikan.
- [10] A. Rahman and G. Chattopadhyay, "Optomal Service Contract Policies for Outsourcing Maintenance Service Assets to the Service Providers," *International Journal of Reliability and Applications*, Vol. 2, No. 8 (2007) 183-197.

LAMPIRAN D

Biodata Penulis



Penulis bernama Erlina Rusiana Dewi, biasa dipanggil Erlina. Penulis dilahirkan di Bojonegoro, 12 Januari 1994. Penulis merupakan putri kedua dari dua bersaudara dari pasangan Bpk. Maderi dan Ibu Misnati. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dari TK Darul Ulum (1998-2000), Madrasah Ibtidaiyah Al-Amin (2000-2006), SMPN 3 Surabaya (2006-2009), dan SMAN 1 Surabaya (2009-2012). Setelah lulus dari SMA, pada tahun 2012 penulis melanjutkan studi ke jenjang S1 di Jurusan Matematika ITS Surabaya melalui jalur SNMPTN dengan NRP 1212 100 084. Di Jurusan Matematika, penulis mengambil bidang minat matematika terapan. Informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat ditujukan ke penulis melalui email: *erlinarusiana@gmail.com*